

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UMA SISTEMÁTICA PARA O PROJETO EM MICROCOMPUTADORES
DE ELEMENTOS ELÁSTICOS DE TRANSDUTORES DE GRANDEZAS MECÂNICAS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Volnei Andersson


Florianópolis, novembro de 1990.

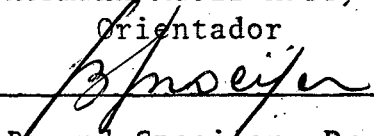
UMA SISTEMÁTICA PARA O PROJETO EM MICROCOMPUTADORES
DE ELEMENTOS ELÁSTICOS DE TRANSDUTORES DE GRANDEZAS MECÂNICAS

Volnei Andersson


ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA

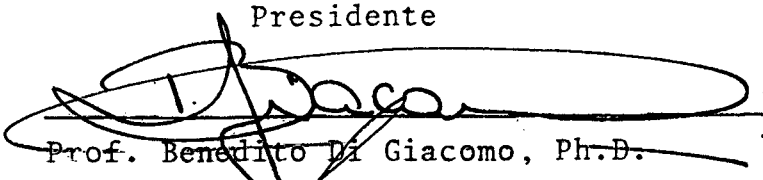
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SÓLIDOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

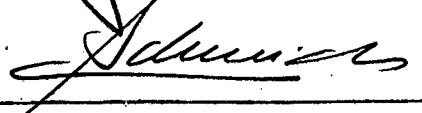

Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr.Ing.
Orientador



Prof. Berend Snoeijer, Dr.Ing.
Coordenador do Curso

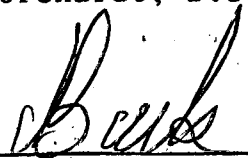
BANCA EXAMINADORA


Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr.Ing.
Presidente


Prof. Benedito Di Giacomo, Ph.D.


Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr.Ing.


Prof. Ildon Borchardt, D.Sc.


Prof. Nelson Back, Ph.D.

Do Autor

Volnei Andersson, o primogênito dos sete filhos de Octávio Andersson e Amália Knabach Andersson, nasceu em Pelotas, no dia 19 de julho de 1947.

Em Pelotas, cursou o primário na Escola Salvacionista, no período de 1956 a 1960. No Colégio Municipal Pelotense, cursou o ginásio e científico, no período de 1962 a 1968.

Em 1969, ingressou na Fundação Universidade do Rio Grande, FURG, para cursar Engenharia Industrial Mecânica. Formou-se em 1973.

Na UFSC, em 1976, iniciou o curso de Mestrado. Obteve o título de Mestre defendendo, em março de 1978, a dissertação intitulada Determinação de Propriedades Seccionais na Flexão, na Torção Uniforme e não Uniforme de Seções de Paredes Delgadas. Em março de 1984, iniciou o curso de Doutorado, também na UFSC.

Durante a graduação de engenharia, trabalhou em indústria alimentícia, no setor de controle de recepção e de estoques produzidos; em serviços de topografia; no ensino do segundo grau; como fiscal em testes de qualificação de soldadores; participou no planejamento e montagem do Laboratório de Máquinas Operatrizes da FURG. Também nesta mesma universidade, foi monitor de Controle Dimensional e recebeu um prêmio pelo alto grau de aproveitamento escolar.

Em 1974, foi contratado pela FURG, como engenheiro e posteriormente professor, onde tem participado em serviços técnicos e administrativos; foi presidente de CIPA; administrou a Divisão de Pesquisas e Orientação Industrial; desenvolveu protótipos de transdutores extensométricos de força e pressão; lecionou disciplinas relacionadas com projeto de máquinas, metrologia e fabricação; orienta projetos de graduação e trabalhos de iniciação científica; tem participado em bancas de concurso público; é o atual responsável pelo Laboratório de Controle Dimensional.

Produziu cinco publicações científicas, sendo uma internacional, e todas relacionadas com atividades dos cursos de mestrado e doutorado.

À minha esposa, Beatriz

Ao meu filho, Fabiano

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Hermann Adolf Harry Lücke pela sugestão do tema e orientação.
- A Carlos Henrique Assuiti e Antônio L. Ferreira pelo auxílio na parte experimental e computacional.
- A todos amigos, colegas e colaboradores do CERTI/LABMETRO e professores que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.
- À Fundação Universidade de Rio Grande pela oportunidade concedida e apoio na finalização do trabalho.

SUMÁRIO

Simbologia	x
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 O uso de elementos elásticos em transdutores eletro-mecânicos	1
1.2 O computador no auxílio ao projeto de elementos elásticos	2
1.3 Os objetivos do trabalho	3
1.4 A relevância dos objetivos	3
1.5 Etapas para alcançar os objetivos	5
2. TRANSDUTORES ELETRO-MECÂNICOS EXISTENTES.....	6
2.1 Transdutores considerados.....	6
2.2 Formas de elementos elásticos.....	8
2.3 Conversores elétricos.....	9
3. METODOLOGIA PARA PROJETO DE TRANSDUTORES.....	13
3.1 Metodologia geral.....	13
3.2 O uso do computador em projetos	15
3.2.1 Interação homem-computador	16
3.2.2 Desenho com o computador	18
3.2.3 Métodos de cálculo e análise	18
3.3 Metodologia empregada para um programa computacional	20
3.3.1 Interatividade	21
3.3.2 Desenhos	22
3.3.3 Cálculos	23
3.3.4 Banco de dados	23
3.3.5 O destino dos resultados do programa	25

4. PROJETO DE TRANSDUTORES COM ELEMENTO ELÁSTICO.....	26
4.1 O problema de projeto e a geração de soluções	26
4.2 A análise das soluções	28
4.3 Cálculo de características	30
4.3.1 Princípios da formulação analítica	30
4.3.2 Tensões, deformações e deslocamento nos elementos elásticos	30
4.3.3 Posição dos conversores elétricos	32
4.3.4 Sinal de saída e sensibilidade	33
4.3.5 Não-linearidade	34
4.3.6 Frequência natural dos elementos elásticos	37
4.3.7 Resolução em sistemas digitais	40
4.3.8 Quantidade de informação e capacidade de canal ...	42
4.3.9 Resolução de transdutores com elemento elástico ..	43
4.3.10 Características de efeitos ambientais	46
4.3.11 Formulações analíticas corrigidas	47
4.4 Formulação para elementos elásticos de transdutores de força	48
5. A SISTEMÁTICA DE PROJETO IMPLEMENTADA EM UM PROGRAMA COMPUTACIONAL	51
5.1 Aspectos gerais de interatividade	52
5.2 Procedimento de projeto.....	55
5.3 Exemplo de projeto com o programa implementado.....	62
5.4 As inovações introduzidas	76
6. VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA APROXIMADA DESENVOLVIDA ...	78
6.1 Validação com o método dos elementos finitos.....	79
6.2 Validação experimental.....	79
6.3 Comparação dos resultados experimentais e de elementos finitos com os da formulação analítica	81

6.3 1	Elementos elásticos tipo viga	81
6.3 2	Elementos elásticos tipo placa circular	82
6.3 3	Elementos elásticos tipo coluna	87
6.3 4	Elementos elásticos tipo anel	91
6.3.5	Resumo	93
7.	ANÁLISE DE PROJETOS OBTIDOS COM O PROGRAMA IMPLEMENTADO	95
7.1	Objetivos, critérios de projeto e procedimento	
	da análise	95
7.1.1	Objetivos da análise	95
7.1 2	Restrições e critérios de projeto	96
7.1 3	Procedimento de análise	99
7.2	Resultados da análise.....	101
7.2 1	VF - valor final da faixa de medição	101
7.2 2	Sinal de saída, resolução e quantidade de informação	108
7.2.3	Tamanho e volume	111
7.2 4	Deslocamento máximo para VF	115
7.2.5	Não-linearidade	117
7.2 6	Frequência natural e máxima capacidade de canal ..	119
7.2 7	Resumo	122
8.	CONCLUSÕES.....	124
8.1	Relacionadas à sistemática, validação e análise de projetos obtidos com o programa implementado	125
8.2	Relacionadas à contribuição do trabalho	127
8.3	Relacionadas à continuidade do trabalho	128
ANEXO A	- Características dos transdutores eletro-mecânicos existentes	130
ANEXO B	- Formulação detalhada para elementos elásticos de transdutores de força	154

ANEXO C - Resultados da análise de projetos obtidos com o	
programa implementado	185
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193

SIMBOLOGIA

A simbologia apresentada refere-se às mais citadas siglas e aos símbolos encontrados nos capítulos 1 até 8 (não são incluídos símbolos denominados apenas nas figuras).

Siglas

A/D	: Analógico/Digital
CAE	: Computer Aided Engineering
E	: conversor Extensométrico
I	: conversor Indutivo
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer
PEETE	: Projeto de Elementos Elásticos de transdutores Eletro-mecânicos
VF	: Valor Final de faixa de medição

Símbolos

a	: dimensão de elemento elástico (m)
a_0	: desvio do zero (V)
a_1, a_2, \dots	: coeficientes constantes de expressões polinomiais
b	: dimensão de elemento elástico (m)
b_0, b_1, \dots	: coeficientes constantes de expressões polinomiais
C	: constante de mola (N/m)
C_T	: capacidade de canal (bit/s)
$E_{\text{analítico}}$	: erro analítico percentual
E_c	: erro absoluto de conversão A/D (V)
E_r	: erro relativo de conversão A/D
F	: força (N)
f_g	: frequência limite máxima indicada corretamente por

	sistemas de medição com conversão A/D (Hz)
f_n	: frequência natural (Hz)
g	: aceleração da gravidade (m/s^2)
h	: dimensão de elemento elástico (m)
K	: rigidez (unidade da grandeza de medição/m/m ou /m)
L	: dimensão de elemento elástico (m)
m	: número de amplitudes digitais consecutivas e distinguíveis
m_0	: massa oscilante e não deformável de elemento elástico (kg)
m_t	: massa oscilante e deformável de elemento elástico (kg)
N	: coeficiente de segurança
$N(X_e)$	: não-linearidade absoluta (V/V ou V)
q	: quantidade de informação (bit)
r	: posição radial sobre placa circular (mm)
R	: resolução absoluta (unidade da grandeza de medição)
r_i	: razão de volumes ($i=1,2,\dots$)
R_r	: resolução relativa
S	: sensibilidade do transdutor (V/V/unidade da grandeza de medição)
S_c	: sensibilidade de conversão (V/V/m/m ou V/V/m)
S_g	: sensibilidade de cada extensômetro resistivo ($\Omega/\Omega/m/m$)
S_I	: sensibilidade interferente (V/V/unidade de X_I)
S_M	: sensibilidade modificadora (V/V/(unidade de X_m e unidade da grandeza de medição))
S_v	: sensibilidade de deslocamento (m/unidade da grandeza de medição)
S_1, S_2, \dots	: sensibilidades de ordem superior
S_e	: sensibilidade de deformação (m/m/unidade da grandeza de

	medição)
U_a	tensão de alimentação de ponte de Wheatstone (V)
U_s	tensão de saída de ponte de Wheatstone (V)
v	deslocamento (m)
V	volume (m^3)
W	carga máxima sobre transdutores de força (N)
x	posição do ponto médio de conversores elétricos em relação aos elementos elásticos (mm)
X_a	signal de saída analógico (V)
X_e	signal de entrada (unidade da grandeza de medição)
X_I	variação da grandeza ambiental interferente
X_M	variação da grandeza ambiental modificadora
X_s	signal de saída (V ou V/V)
\bar{X}_s	amplitude da faixa de valores discretos do signal de saída convertido (V)
y	o mesmo que x
δ_v	resolução de desloc. de saída do elemento elástico (m)
δX_e	resolução absoluta de entrada (unidade da grandeza de medição)
$\delta \bar{\epsilon}$	resol. de deform. de saída do elemento elástico (m/m)
ΔX_s	resolução de saída digital (V)
ϵ	deformação específica (m/m)
$\bar{\epsilon}$	deform. específica média em extens. resistivos (m/m)
$\bar{\epsilon}$	deform. específica aparente em ponte de Wheats. (m/m)
η	não-linearidade terminal extrema (%VF)
η_e	não-linearidade elétrica terminal extrema (%VF)
η_m	não-linearidade mecânica terminal extrema (%VF)

RESUMO

Elementos elásticos são componentes vitais de transdutores empregados na medição de força, pressão, torque, aceleração e deformação, pois tais grandezas causam-lhes a deformação elástica, que é transformada em sinal elétrico através de um conversor apropriado.

Neste trabalho, desenvolveu-se uma sistemática especializada, apropriada a microcomputadores, para auxiliar o projeto de elementos elásticos desses transdutores. Essa sistemática foi implementada num programa computacional, constituindo-se numa nova ferramenta, que possibilita uma avaliação interativa da necessidade do projeto de tais transdutores, e o projeto de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial, para o qual são usados conversores extensométricos e indutivos, ou outros especificáveis similarmente.

Utilizando resultados experimentais e obtidos com o método dos elementos finitos, comprovou-se que a formulação analítica aproximada, usada no programa e deduzida para os elementos elásticos, tem validade para projetos preliminares.

O programa implementado foi usado para gerar várias soluções de projeto, analisadas segundo restrições e critérios estabelecidos. Os resultados da análise produziram recomendações e novas informações que facilitam a escolha de elementos elásticos. Além disso, comprovou-se que as características obtidas com o programa podem abranger e substituir as características de transdutores existentes.

A B S T R A C T

Elastic elements are vital components of transducers usually employed for measuring force, pressure, torque, acceleration and deformation. This is possible because such measurands cause an elastic deformation which is transformed into electrical signal by a properly especified converter.

In this work, a specialized sistematic for microcomputer aided design of elastic elements from transducers of those measurands was established. The sistematic was implemented through a computer program providing a new design tool. The program enables an interactive evaluation of the design necessity of those transducers and also gives a design of elastic elements for one component force transducers. Extensometric and inductive or other similarly especified converters are used in the program.

The aproximated analytical formulation deduced for the elastic elements used in the program was compared with available experimental and finite elements results. The comparison confirms that the formulation is valid for preliminar designs.

The implemented program was used to generate a variety of design solutions. These solutions were analysed under established restrictions and design criteria. The outcoming of the analysis produces design recommendations and valuable information which help to choose the elastic elements. Furthermore, it was confirmed that the characteristics obtained from the program may contain and replace those of existing force transducers.

1. INTRODUÇÃO

1.1 O USO DE ELEMENTOS ELÁSTICOS EM TRANSDUTORES ELETRO-MECÂNICOS

Elementos elásticos são componentes vitais de muitos transdutores empregados na medição de força e de grandezas relacionadas como massa, pressão, torque ou aceleração.

Na figura 1.1, mostram-se os componentes básicos de tais transdutores - o elemento elástico e os conversores de deformação elétricos. Nota-se que, sob ação da grandeza a medir, o elemento elástico propicia a deformação (absoluta ou específica) a ser transformada em sinal elétrico, usando o tipo de conversor apropriado.

Dependendo das condições de uso e de exigências metrológicas, como faixa de medição e erros tolerados, os componentes básicos proporcionam várias soluções de projeto de transdutores.

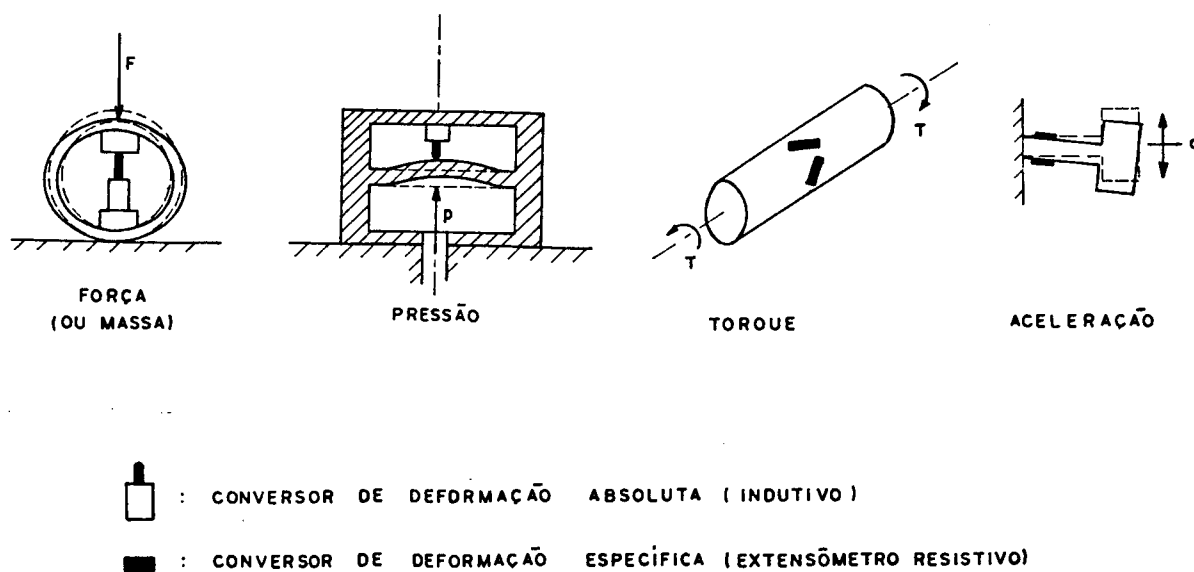


Fig. 1.1-Componentes básicos dos transdutores eletro-mecânicos (elemento elástico e conversores elétricos).

Essas soluções distinguem-se basicamente pelo grande número de combinações entre:

- Forma geométrica do elemento elástico (principalmente em transdutores de força);
- Material do elemento elástico;
- Conversor elétrico.

Em geral, as combinações aproveitadas pelos fabricantes limitam-se a uma família de transdutores, que pode ser caracterizada por várias faixas de medição, empregando diferentes tamanhos de uma mesma forma de elemento elástico e um tipo particular de conversor elétrico.

Considerando as informações de catálogos ou de bibliografia, não fica claro qual a razão específica da escolha da forma dos elementos elásticos pelos fabricantes. Supõe-se que influem a tradição e os interesses econômicos.

1.2 O COMPUTADOR NO AUXÍLIO AO PROJETO DE ELEMENTOS ELÁSTICOS

Existem várias possibilidades de usar o computador no projeto de elementos elásticos, empregando-o como :

- Calculadora para efetuar o dimensionamento, segundo equações analíticas especialmente desenvolvidas, ou métodos numéricos, principalmente baseados no método dos elementos finitos;
- Banco de dados para armazenar propriedades e desenhos de elementos elásticos, características dos conversores elétricos, resultados do projeto;
- Ferramenta de desenho interativo e/ou segundo técnicas específicas.

Um programa ideal para o projeto de elementos elásticos deve unir essas três aplicações do computador.

1.3 OS OBJETIVOS DO TRABALHO

Os quatro principais objetivos do trabalho são:

- 1) Mostrar as possibilidades do desenvolvimento de um sistema CAE (Computer Aided Engineering), de nível médio, baseado em formulação analítica aproximada, que permite o projeto iterativo e sistemático de elementos elásticos para transdutores de força, pressão, torque, aceleração e deformação, e que pode ser usado em microcomputadores;
- 2) Implementar um programa computacional, como exemplo, para o dimensionamento de elementos elásticos e cálculo de um determinado grupo de características de transdutores de força uniaxial;
- 3) Testar o programa implementado, comparando seus resultados com os de protótipos disponíveis ou com os encontrados na bibliografia;
- 4) Usar o programa, explorando sistematicamente projetos para combinações forma-material-conversor, com a finalidade de obter recomendações relativas ao projeto de transdutores, em aplicações típicas ou específicas.

1.4 A RELEVANCIA DOS OBJETIVOS

A relevância dos objetivos do trabalho justifica-se como segue:

- 1) Um sistema CAE, integrado e próprio para o projeto de elementos elásticos empregados em transdutores eletro-mecânicos, não foi encontrado na bibliografia. O desenvolvimento de tal sistema,

permitindo projetos interativos e sistemáticos, proporciona uma nova ferramenta, de muita utilidade para as empresas especializadas e para laboratórios de pesquisa, que frequentemente necessitam construir transdutores específicos, em pequenas séries ou exemplares únicos;

2) A implementação de um programa, para auxiliar o projeto de elementos elásticos de transdutores de força, serve como um exemplo de aplicação da sistemática desenvolvida, que pode ser igualmente empregada, com relativa facilidade, para ampliar o programa ao projeto de elementos elásticos de outros transdutores eletro-mecânicos;

3) Os testes do programa mostram a validade de empregar formulação analítica aproximada, adequada a microcomputadores de pequeno porte, tendo possibilidades de dimensionar elementos de várias formas, com o correspondente cálculo de características do transdutor;

4) Os resultados e recomendações, que se obtêm ao analisar projetos com o programa, são úteis na escolha da forma adequada do elemento elástico e possibilitam, pela primeira vez, uma classificação dos transdutores de força, com relação às características construtivas e metrológicas alcançáveis. Uma comparação destas com as de transdutores de mercado revela que é desnecessário empregar a grande variedade de formas de elementos elásticos, para conseguir-se as faixas de características existentes.

1.5 ETAPAS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

Para alcançar os objetivos do trabalho, são efetuadas as seguintes tarefas:

- 1) Apresentação das possibilidades de projeto dos transdutores, partindo de um levantamento das características de transdutores existentes, obtidas das informações de fabricantes e bibliografia. Essas características servem para subsidiar a implementação do programa computacional e também para a avaliação do projeto de transdutores de força uniaxial de mercado, feita com auxílio do programa (capítulo 2 e anexo A);
- 2) Realização de uma análise das possibilidades de projeto auxiliado por computador (capítulo 3);
- 3) Desenvolvimento de uma formulação analítica aproximada para o projeto de elementos elásticos (capítulo 4 e detalhes no anexo B);
- 4) Implementação sistematizada do programa (capítulo 5);
- 5) Validação da formulação analítica desenvolvida (capítulo 6);
- 6) Avaliação dos resultados de uma análise de projetos obtidos com o programa computacional implementado (capítulo 7 e anexo C).

2. TRANSDUTORES ELETRO-MECÂNICOS EXISTENTES

2.1 TRANSDUTORES CONSIDERADOS

Nesta tese são considerados os transdutores utilizados na medição de força e das grandezas dela derivadas como pressão, torque, aceleração e deformação.

Na figura 2.1, representa-se a estrutura funcional básica desses transdutores. Observa-se que são indicadas algumas possibilidades de elementos elásticos e de conversores elétricos.

Para fornecer subsídios ao desenvolvimento de um sistema computacional de auxílio ao projeto dos transdutores considerados, necessita-se conhecer as características construtivas e

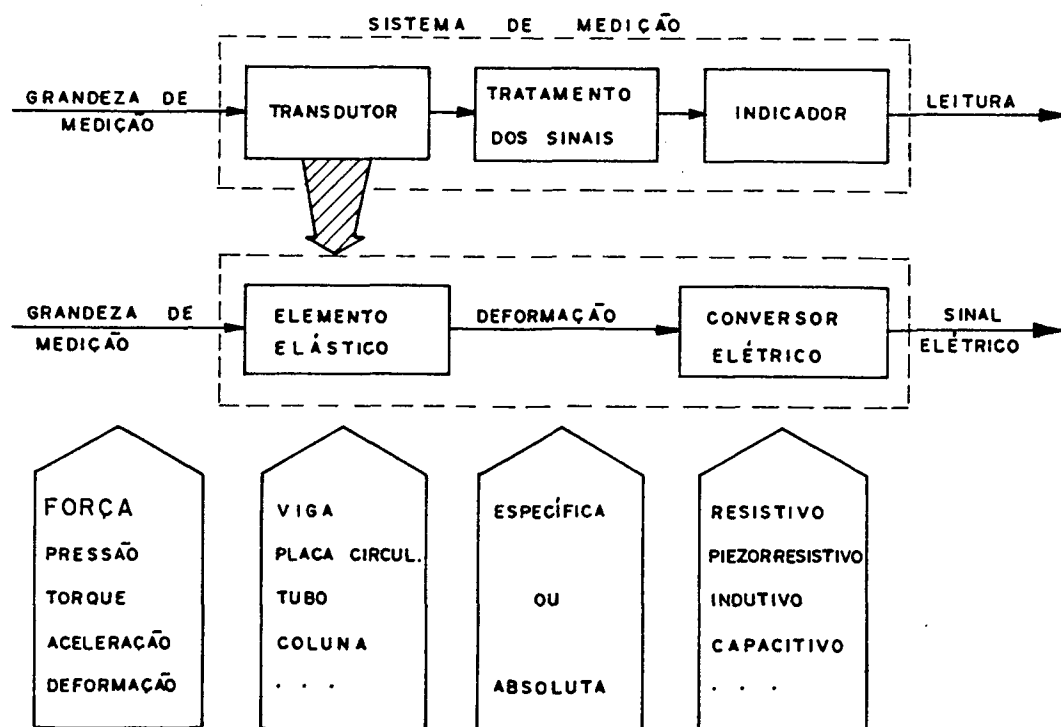


Fig. 2.1 - Estrutura funcional básica dos transdutores eletro - mecânicos considerados na tese.

metrológicas associadas aos elementos elásticos e conversores elétricos.

Essas informações foram obtidas através de um levantamento das características de transdutores existentes [11,41,48], principalmente de mercado, e estão apresentadas no anexo A, organizadas de modo a se relacionarem com formas de elementos elásticos e princípios de conversão elétrica.

Na busca de informações para tal levantamento, foram analisadas 86 publicações do tipo catálogos de fabricantes e compêndios específicos. Mas surgiram algumas dificuldades relacionadas com:

- Informações pouco representativas, para transdutores indutivos de força;
- Ausência de certas informações, como material do elemento elástico, algumas vezes resolução;
- Terminologia empregada, como definições de não-linearidade, resolução, frequência natural;
- Identificação das formas de elemento elástico, principalmente dos transdutores de força.

Em certos casos, para aumentar a confiabilidade dos valores encontrados, necessitou-se consultar bibliografia adicional do tipo:

- Livros sobre transdutores [35,72,78,92,93];
- Artigos e revistas especializadas [16,59,69,97];
- Publicações técnicas de fabricantes [71,74];
- Manuais de operação [60].

As informações obtidas são empregadas no programa implementado, na maneira descrita no capítulo 5.

2.2 FORMAS DE ELEMENTOS ELÁSTICOS

No quadro da figura 2.2, indicam-se as formas básicas dos elementos elásticos mais usados, conforme o levantamento citado. Observa-se que vigas são empregadas em todos transdutores considerados e diafragmas, fole, tubos são particulares aos transdutores de pressão. Embora estes apresentem maior quantidade (6) de formas básicas, o número de variações encontradas para as 4 formas básicas de transdutores de força, supera amplamente as dos demais.

Assim, a implementação de um programa computacional, como exemplo de aplicação de uma sistemática de projeto, é favorecida pelo grande número de variações de elementos elásticos de transdutores de força, porque podem ser proporcionadas diversas soluções alternativas de projeto.

Transdutor → El. elástico básico ↓	Força	Pres- são	Torque	Acele- ração	Defor- mação
Viga	|||||	|||||	|||||	|||||	|||||
Barras de sec. variadas	|||||		|||||		|||||
Placa circular	|||||	|||||			
Anel	|||||				
Diafr. liso ou corrugado		|||||			
Fole		|||||			
Tubos Bourdon		|||||			
Tubo liso		|||||			
No. catálogos consultados	20	40	9	11	6

Fig. 2.2 - Formas básicas dos elementos elásticos mais usados nos transdutores eletro-mecânicos.

Para tal propósito, os elementos elásticos de transdutores de força foram classificados por grupos, como no quadro que segue.

VIGAS	PLACAS CIRCULARES
Simples	Uniformes simples
Duplas	Uniformes em série
Múltiplas radiais	Uniformes em paralelo
Cisalhantes (*)	Não-uniformes
COLUNAS	ANÉIS
Simples	Circulares
Múltiplas	Ovais
Colunas-anéis	Retangulares não-uniformes
	Retangulares uniformes

(*) : usado para distingui-las das vigas à flexão de mesma forma (figura 2.3)

Em correspondência com essa classificação, escolheram-se as 36 variações de elementos elásticos, cujos esboços constam na figura 2.3, para serem usados no programa a implementar.

Tomando como exemplo as vigas, repara-se que na figura 2.3 o grupo de vigas simples é constituído de 4 variações distintas de elementos elásticos. A esse grupo correspondem gamas de valores de determinadas características, destacando-se a faixa de medição, cujos valores limites superiores vão desde 1mN até 1kN, conforme se pode observar no anexo A, onde também constam gamas de características para outros grupos de elementos elásticos.

2.3 CONVERSORES ELÉTRICOS

No quadro da figura 2.4 são mostrados os diferentes conversores elétricos mais usados nos transdutores das grandezas



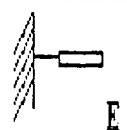

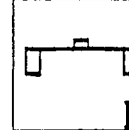
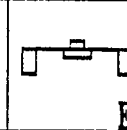
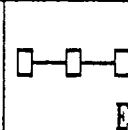
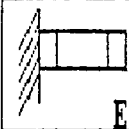
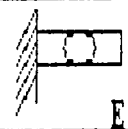
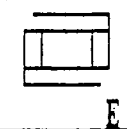
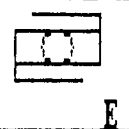
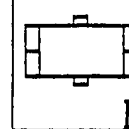
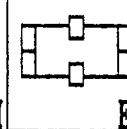
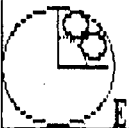


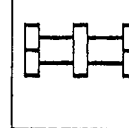


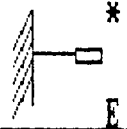
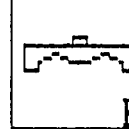
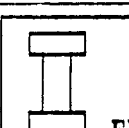
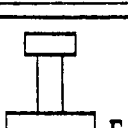
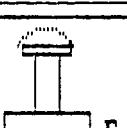
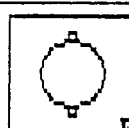
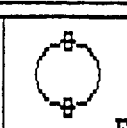
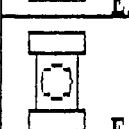
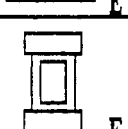
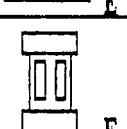
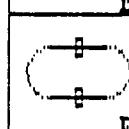
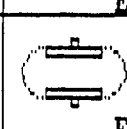
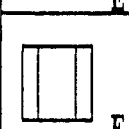
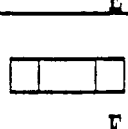
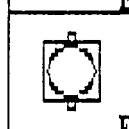
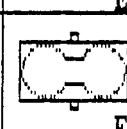
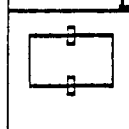
VIGAS				PLACAS CIRCULARES			
							
							
							
							
COLUNAS				ANÉIS			
							
							
							
							

Fig. 2.3 - Variações de formas de elementos elásticos, para transdutores de força, usadas no programa implementado.

mecânicas consideradas. Os valores percentuais indicam a frequência de uso aproximada de cada tipo de conversor, para cada grandeza mecânica, entre os catálogos consultados. Nota-se que extensômetros resistivos são usados em todos transdutores e em segundo lugar estão os indutivos.

Extensômetros resistivos dominam o mercado e o seu emprego

Transdutor Tipo de conv.el.	Força	Pres- são	Torque	Acele- ração	Defor- mação
Extens. resistivo	75%	70%	100%	45%	80%
Indutivo	25%	30%		20%	15%
Extens. piezorresistivo	30%	35%		30%	
Piezoelétrico	10%	10%		65%	
Capacitivo	5%	15%			
Potenciométrico		3%		10%	
óptico (fotodetector)		3%			
No. catálogos consultados	20	40	9	11	6

Fig. 2.4 - Conversores elétricos mais usados em transdutores com elemento elástico (com percentuais de uso de cada tipo entre os catálogos consultados, para cada grandeza).

deverá continuar por algum tempo, pois têm surgido tipos de extensômetros coláveis com inovações tecnológicas como a possibilidade de autocompensação da fluência e da sensibilidade transversal [51], o uso de alta resistência elétrica [38], ou adicionalmente compensação térmica do módulo de elasticidade do material de elementos elásticos, com forma apropriada, e também circuito de resistores para balanceamento do zero e calibração [73].

No quadro da figura 2.4, nota-se que, entre os transdutores indutivos, os de pressão apresentam o maior percentual de uso desse tipo de conversor elétrico. Entre as causas do menor emprego desses conversores, em relação aos extensômetros resistivos, estão o seu alto custo de aquisição e o valor relativamente alto da sua não-linearidade. No entanto, empregando técnicas especiais de construção [6], ou microeletrônica (linearização) incorporada ao

transdutor [40], esse tipo de erro diminui. Conversores comuns do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), por exemplo, têm não-linearidade da ordem de 0.25% VF (valor final de escala), mas podem ser construídos com não-linearidade até 0.05% VF [6] , proporcionando o desenvolvimento de transdutores equiparáveis aos melhores extensométricos que têm classe de precisão da ordem de centésimos de % VF. Além disso, eles apresentam vantagens como proporcionar transdutores de menor resolução, a flutuação do zero com o tempo é mais estável que os extensômetros colados, e alguns deles não necessitam proteção adicional em ambientes hostis.

Para a implementação do programa computacional, consideram-se esses dois tipos de conversores (recomendados pelas letras E-extensométrico ou I-indutivo, para cada elemento elástico, na figura 2.3), mas também admitem-se outros que possam ser especificados identicamente.

3. METOLOGIA PARA PROJETO DE TRANSDUTORES

3.1 METODOLOGIA GERAL

Sob o enfoque dos problemas de engenharia, projeto é um processo criativo que inicia com uma necessidade e define um dispositivo ou sistema e os métodos de sua realização ou implementação, de modo a satisfazer os requisitos envolvidos [44].

Metodologia de projeto, para esta tese, é a estrutura ou o sistema de métodos aplicados ao problema particular de projeto de elementos elásticos de transdutores eletro-mecânicos.

O tipo de metodologia, que tem sido mais usado em engenharia, é o que consiste na delineação da estrutura de um processo geral de projeto, a qual pode ser usada como base para projetos particulares [15, 18, 44].

Tal estrutura pode ser aplicada para projetos de transdutores, como descreve FINKELSTEIN [3,42,43,44], um dos poucos pesquisadores que têm estudado o processo de projeto de sistemas de medição, com abordagem metodológica.

BOSMAN [27] tratou o problema com enfoque principal em aspectos elétricos. Na sua metodologia destaca-se o particionamento funcional do sistema de medição, que representa uma divisão em subproblemas. Esta ação e a iteratividade são características típicas do processo de projeto.

Para continuar o assunto, dá-se um esclarecimento de como são interpretados, em relação a valores, nesta tese, os três termos que seguem:

- 1) Requisitos de projeto: são valores inicialmente desejados das características metrológicas e construtivas, envolvidas no projeto do elemento elástico;
- 2) Restrições de projeto: são os valores limites explícitos (tamanho máximo, frequência natural mínima, sinal elétrico máximo permitidos, etc.) e implícitos (tensão máxima no elemento elástico, máxima deformação nos extensômetros resistivos, distância mínima devido ao princípio de Saint Venant permitidos, etc.) atribuídos às características de projeto;
- 3) Critérios de projeto: são condições impostas às características envolvidas no projeto e estabelecidas escolhendo uma ou um grupo delas, que servem para avaliar o dimensionamento do elemento elástico. Assim, tensões atuantes no elemento elástico devendo estar abaixo de um valor admissível, obtenção de sinal de saída máximo junto com deslocamento mínimo, obtenção de não-linearidade menor do que um valor estabelecido, são exemplos de critérios de projeto.

O particionamento funcional e a iteratividade são características também encontradas no processo de projeto para sistemas de medição, proposto por FINKELSTEIN [43,44], cujas etapas apresentam-se aqui na ordem que se julga apropriada ao projeto de elementos elásticos, como segue:

- Busca de informações e organização (a principal entrada de informações é a especificação dos requisitos);
- Geração de um conjunto de soluções candidatas (característica central da atividade de projeto);
- Formulação dos critérios para avaliar soluções candidatas (depende dos requisitos e da solução candidata a ser avaliada);

- Análise das soluções candidatas (cálculos, simulação, construção de modelos; as soluções candidatas são avaliadas com base nos critérios adotados);
- Decisão (comparação das soluções candidatas para julgar a melhor).

Nas publicações sobre projeto de transdutores, raramente se comenta a metodologia empregada. Geralmente são descritos a formulação usada, com exemplos de aplicação, e os resultados obtidos em ensaios de protótipos. Diferentes tópicos de projeto são encontrados de forma individual. Eles dizem respeito a:

- Critérios de dimensionamento utilizados [5, 7, 29, 39, 80, 81, 90];
- Roteiros ou procedimentos de dimensionamento do elemento elástico [5, 7, 80, 81];
- Cálculo de características como sensibilidade, não-linearidade, deslocamento, frequência natural [28, 29, 39];
- Calibração [5, 29, 39, 62, 81];
- Compensação ou correção de erros sistemáticos [24, 35, 39, 62, 69, 89].

3.2 O USO DO COMPUTADOR EM PROJETOS

A intensidade em que o computador é usado nas etapas de projeto dá diretamente o grau de automação do processo de projeto.

Os elementos que figuram num processo de projeto auxiliado por computador são o homem, o problema e a máquina computacional. A interação destes constitui um sistema de projeto auxiliado por computador, onde o último é empregado como uma calculadora, um

banco de dados e uma ferramenta de desenho.

Aspectos importantes do projeto auxiliado por computador, relativos a evolução [25,31,56], aplicações [94], configurações de *hardware* [83,91,94] e recursos de *software* [25,56,65,91], são amplamente divulgados na bibliografia, porém secundários para alcançar os objetivos desta tese. Mas os aspectos que interessam referem-se à metodologia [25,91], notadamente no que diz respeito à sistematização do projeto, para implementação no computador.

A implementação de uma metodologia de projeto no computador requer o uso de técnicas apropriadas, as quais podem ser abordadas conforme os seguintes aspectos:

- Quanto ao modo de interação homem-computador;
- Quanto ao modo de desenhar;
- Quanto aos métodos de cálculo e análise.

3.2.1 Interação homem-computador

Com relação ao modo de interação, em [54] os autores testaram (entre 68 usuários) três programas baseados respectivamente nas seguintes técnicas:

- Otimização;
- Simulação linear;
- Simulação modular.

A *otimização* é a busca da melhor solução para um problema de engenharia [18,82]. O computador permite obtê-la por tentativas, interativamente, ou empregando técnicas matemáticas. Geralmente a otimização baseada nestas técnicas não apresenta interação homem-computador, é conhecida como projeto automático e a melhor solução resulta para um conjunto de parâmetros de entrada. Consiste

na minimização ou maximização de uma função que melhor represente o problema físico. Para isso existem rotinas de cálculo apropriadas e encontradas na bibliografia [82]. Como tais rotinas normalmente requerem um valor de partida dado pelo usuário, essa técnica é mais conveniente nos últimos estágios de projeto, quando o problema já tenha sido explorado e os parâmetros e restrições bem definidos [54].

O uso da otimização com técnicas matemáticas no projeto de sistemas de medição é pouco divulgado. ABDULLAH [3] empregou-a ao projetar um galvanômetro de bobina móvel, adotando o critério de custos mínimos. No caso de elementos elásticos, os exemplos mostrados por MACCARTHY [63] tratam, respectivamente, da maximização de deformação específica e de frequência natural, para um elemento viga, considerando só a espessura como variável geométrica e usando conversor extensométrico. Outro caso é a otimização de dimensões e material de um elemento tipo coluna tubular [8], utilizando o método gráfico-analítico de JOHNSON [57].

Na técnica de **simulação linear**, o computador comanda o diálogo através de uma série de questões que se desenvolvem progressivamente.

Na técnica de **simulação modular**, o diálogo é comandado pelo usuário através das várias opções apresentadas num menu, na ordem por ele determinada.

Conforme conclusão de tais autores, **otimização e modularidade** dão o melhor modelo para o processo de projeto auxiliado por computador.

3.2.2 Desenho com o computador

Em computação gráfica, são usadas representações de desenho que vão desde simples esquemas até modelos sólidos coloridos e com sombreamento.

No projeto de engenharia são comuns desenhos bidimensionais, representados por planos cotados. Estes desenhos podem ser desenvolvidos por técnicas tais como [91,94]:

- Construção a partir de recursos básicos de um editor gráfico (primitivas gráficas e utilitários);
- Planos de desenhos;
- Variações.

A técnica de planos de desenhos consiste em construir planos, contendo informações parciais do desenho, que são sobrepostos como se fossem transparências.

Na técnica das variações, o desenho é definido por macros (construção gráfica por procedimentos específicos) [91] com as cotas denominadas alfabeticamente. Essa técnica aplica-se a famílias de objetos que possuem a mesma topologia, mas diferentes dimensões.

3.2.3 Métodos de cálculo e análise

Os métodos de cálculo e análise utilizados em projeto, basicamente dividem-se em métodos numéricos e métodos clássicos que empregam formulação analítica.

No projeto de transdutores com elemento elástico, podem ser usados os métodos numéricos de diferenças finitas [2], elementos de contorno [30] e elementos finitos [1,2,4,20,21,29,50,84,85]. Entre

eles, o método dos elementos finitos é o de maior aplicação na análise de tensões e deformações. Ele também pode ser aplicado nas etapas de projeto, utilizando malhas grosseiras para diminuir seu tempo de operação, substituindo assim alguns testes experimentais preliminares, comuns em desenvolvimento de produtos [9].

O método dos elementos finitos, associado aos recursos da computação gráfica, possibilitou o desenvolvimento de pacotes de uso geral em engenharia, que têm sido aplicados em simulação, também no projeto de transdutores com elementos elásticos [2,4,87].

O uso desses pacotes, especificamente para o projeto de elementos elásticos, apresenta inconvenientes tais como:

- Custo de aquisição relativamente alto do equipamento requerido (porte do computador) e do próprio *software*;
- Tempo de operação relativamente longo para analisar formas simples;
- Necessidade de interfacear aplicativos especiais para o cálculo das características do transdutor (tarefa não simples);
- Otimização lenta da forma escolhida (mesmo para usuário experiente em transdutores);
- A melhor forma tem de ser escolhida previamente pelo usuário.

Os métodos clássicos são baseados em formulação analítica existente na bibliografia que, frequentemente, tem de ser desenvolvida para a aplicação específica. Eles são de uso geral e indispensáveis em qualquer desenvolvimento de projeto, como no caso dos elementos elásticos. Para este caso apresentam vantagens tais como:

- Possibilitar o desenvolvimento de aplicativos que requerem

- equipamento computacional de pequeno porte;
- Implementação de aplicativos rápidos que dão o cálculo completo (sistema autônomo) das características estabelecidas, com a interatividade compatível à sistemática de projeto criada;
 - Dimensionamento preliminar de vários elementos elásticos em pouco tempo, o que facilita a escolha e otimização da sua melhor forma;
 - Uso de formulação analítica aproximada, que pode ser corrigida experimentalmente ou com o método dos elementos finitos.

3.3 METODOLOGIA EMPREGADA PARA UM PROGRAMA COMPUTACIONAL

A implementação de uma sistemática de projeto de elementos elásticos de transdutores eletro-mecânicos, em um programa computacional, requer a reunião de conhecimentos relacionados com metodologia para projeto de transdutores, técnicas de uso do computador, teoria e construção de transdutores, experiência concernente acumulada.

Com esses conhecimentos pode-se criar um sistema interativo especializado, próprio para microcomputador, que contenha orientações de projeto ao usuário.

O sistema idealizado desta tese baseia-se na metodologia estabelecida por FINKELSTEIN [43,44], abordada no início deste capítulo, cujas etapas vão desde a especificação de requisitos de projeto até a decisão de escolha da melhor solução candidata.

Essas etapas serão conduzidas pelo usuário, empregando o microcomputador para cálculos, desenhos e armazenamento de

informações, conforme os aspectos que seguem, relacionados especificamente ao projeto de elementos elásticos.

3.3.1 Interatividade

A sistemática para o projeto de elementos elásticos deverá proporcionar um programa computacional semiautomatizado, onde a intervenção do usuário seja requerida na especificação eventual dos materiais de elementos elásticos, na especificação dos conversores elétricos e no acionamento, via teclado, das opções oferecidas. Dependendo das decisões do usuário, o programa terá decisões internas, referentes aos procedimentos de cálculos e orientações de projeto.

Para as especificações e o acionamento das opções oferecidas, as três técnicas de interação homem-computador (otimização, simulação linear e modularidade) serão usadas de forma interdependente.

A otimização, usando um algoritmo matemático simples, será oferecida como um módulo opcional que emprega, em si, a simulação linear na forma de questões específicas, de informações de entrada e decisão.

A simulação linear será empregada dentro de módulos, em procedimentos de especificações dos materiais de elementos elásticos, dos conversores elétricos, e implicitamente de construção dos desenhos e de dimensionamentos.

A modularidade poderá ser visualizada através das opções em forma de menus, onde cada uma refere-se a um procedimento específico, ou grupo de procedimentos acionados por submenus e organizados em módulos de programa.

Embora as técnicas de otimização e modularidade proporcionem o melhor modelo para o processo de projeto, a implementação de um programa, que use somente tais técnicas, exigiria o desenvolvimento de módulos de otimização particulares a cada forma de elemento elástico, devido às diferentes formulações e distintos parâmetros geométricos envolvidos. Um módulo geral e simplificado, comum a todos elementos elásticos, pode ser desenvolvido considerando apenas uma variável geométrica independente. Desse modo têm-se cálculos rápidos e economia de memória do computador.

A otimização também pode ser obtida por tentativas, interativamente, resultando assim soluções de projeto que dependam também da experiência do usuário.

Por tais razões, optou-se pelo uso interdependente das três técnicas comentadas de interação homem-computador.

3.3.2 Desenhos

Os desenhos do programa computacional serão apresentados como um esboço fixo, tanto para a forma dos elementos elásticos, quanto para a orientação da posição dos conversores e ligação em ponte de Wheatstone (meia ou completa) de conversores extensométricos. Os esboços dos elementos elásticos serão vistos num plano, tendo as cotas designadas literalmente, e determinadas segundo os procedimentos de dimensionamento.

Para construir os esboços, as técnicas de planos de desenhos e variações serão aplicadas em conjunto, utilizando procedimentos computacionais especialmente desenvolvidos.

A vantagem de usar essas técnicas é a rapidez na construção dos desenhos, favorecendo a automação do processo e diminuindo o

tempo para a escolha e otimização da forma do elemento elástico.

A construção a partir dos recursos básicos de um editor gráfico é lenta e pode produzir formas não previstas na formulação, pois depende da imaginação do usuário.

3.3.3 Cálculos

Os cálculos de dimensionamento e das características consideradas, a efetuar no programa, serão baseados exclusivamente em formulação analítica aproximada, desenvolvida para os tipos de conversores e formas de elementos elásticos considerados (capítulo 2).

Optou-se pelo uso exclusivo de formulação analítica devido às vantagens anteriormente citadas (computador de pequeno porte, alta velocidade de cálculo, possibilidade de corrigir formulação analítica aproximada).

3.3.4 Banco de dados

Um sistema CAE, para o projeto dos transdutores considerados, requer um sistema de banco de dados para armazenar informações relativas à forma e material dos elementos elásticos, e especificações dos conversores elétricos (inclusive a própria forma destes).

Esse sistema de banco de dados é típico de problemas de engenharia [23] e pode ser empregado também em projeto de elementos de máquinas, análise teórica ou experimental de tensões, usinagem [26]. O seu desenvolvimento é relativamente complexo e exige uma abordagem ampla, que considere tais aplicações.

Existe a possibilidade de aproveitar sistemas de bancos de dados de mercado, próprios para microcomputadores. Uma dificuldade que pode aparecer é o interfaccamento com o programa computacional a implementar.

Outra solução seria desenvolver um sistema de armazenamento de dados como um módulo do programa computacional, usando uma mesma linguagem de programação.

Uma alternativa simples consiste em guardar as informações de material e de conversores elétricos no próprio programa, dentro de procedimentos computacionais específicos.

Esta é a solução adotada para o programa computacional de exemplo da tese, devido à facilidade e ao menor tempo de implementação.

Assim, os desenhos das formas de elementos elásticos, das orientações da posição dos conversores elétricos e de ligações em ponte de Wheatstone serão guardados em arquivos próprios, contendo procedimentos para construí-los.

Da mesma maneira, as propriedades dos materiais dos elementos elásticos serão armazenadas num arquivo contendo o procedimento específico e apresentadas em uma tabela, na forma de menu, para a escolha do material.

Para os conversores elétricos, numa primeira versão a implementar, os procedimentos requerem a entrada de dados através do usuário, consultando catálogos de fabricantes. Decidiu-se por esta maneira porque os conversores existentes no mercado apresentam uma variedade enorme de formas e tamanhos, sendo impraticável desenhar as que poderiam ser usadas. Além disso, considerou-se a diversidade do estoque disponível de cada usuário.

3.3.5 O destino dos resultados do programa

Os transdutores eletro-mecânicos considerados nesta tese em geral têm os seguintes componentes: elemento elástico; conversores elétricos; estrutura mecânica de proteção; dispositivos mecânicos de fixação, de segurança e de aplicação de cargas; circuito para correção e transmissão de sinais elétricos; conectores elétricos.

Um sistema CAE completo deveria possibilitar o projeto de transdutores eletro-mecânicos, contendo todas informações resultantes, relacionadas com desenhos, especificações e cálculo de características.

A metodologia que se propõe nesta tese foi idealizada a fim de proporcionar um programa computacional para o dimensionamento do elemento elástico, a especificação e o arranjo dos conversores elétricos em relação ao elemento elástico, e o cálculo de características metrológicas e construtivas tais como resolução, frequência natural, sinal de saída e dimensões do elemento elástico. Assim, caracteriza-se um nível de detalhamento de projeto que pode ser denominado projeto preliminar.

Os resultados desse projeto preliminar dão uma previsão do comportamento do transdutor e são básicos para a construção de protótipos.

Caso seja requerido um detalhamento de desenhos, para construção ou para uma análise minuciosa de tensões e deformações, com métodos numéricos, os esboços, que o programa fornecerá, poderão ser complementados com o uso de editores de desenho existentes no mercado.

4. PROJETO DE TRANSDUTORES COM ELEMENTO ELÁSTICO

4.1 O PROBLEMA DE PROJETO E A GERAÇÃO DE SOLUÇÕES

O problema de projeto de transdutores com elemento elástico consiste em determinar e arranjar seus componentes básicos (elemento elástico e conversores elétricos) e outros dispositivos, de modo que seja atendido um grupo de requisitos iniciais (características metrológicas e construtivas), segundo os critérios estabelecidos.

Para obter-se um conjunto de soluções candidatas, além da capacidade do projetista, é importante conhecer a experiência acumulada e disponível de projetos anteriores. Nesse sentido, são úteis o levantamento das características de transdutores existentes (capítulo 2) e as recomendações encontradas na bibliografia especializada [7,37,49,62,69,78,85,86], tais como:

- Formas de elementos elásticos mais usados;
- Material apropriado de elementos elásticos;
- Tipos de conversores elétricos mais usados;
- Arranjo dos conversores elétricos;
- Uso de juntas elásticas;
- Minimização de efeitos térmicos;
- Proteção.

Adicionalmente deve-se considerar a existência de restrições tais como viabilidade econômica, disponibilidade dos componentes no mercado, tecnologia de construção e recursos de testes, que podem eliminar algumas soluções candidatas [69].

Outro fator importante é a relação de compromisso contraditória que ocorre implicitamente entre certas características. São exemplos clássicos as relações sensibilidade versus rigidez, sensibilidade versus resolução, e sensibilidade versus faixa de medição. Na figura 4.1, tem-se uma representação sintetizada do problema de projeto dos transdutores com elemento elástico, visto de forma global, com os itens abrangidos pela metodologia, e um roteiro básico que inicia com uma etapa de avaliação da necessidade do projeto e vai até a etapa de compensação de erros e ajuste.

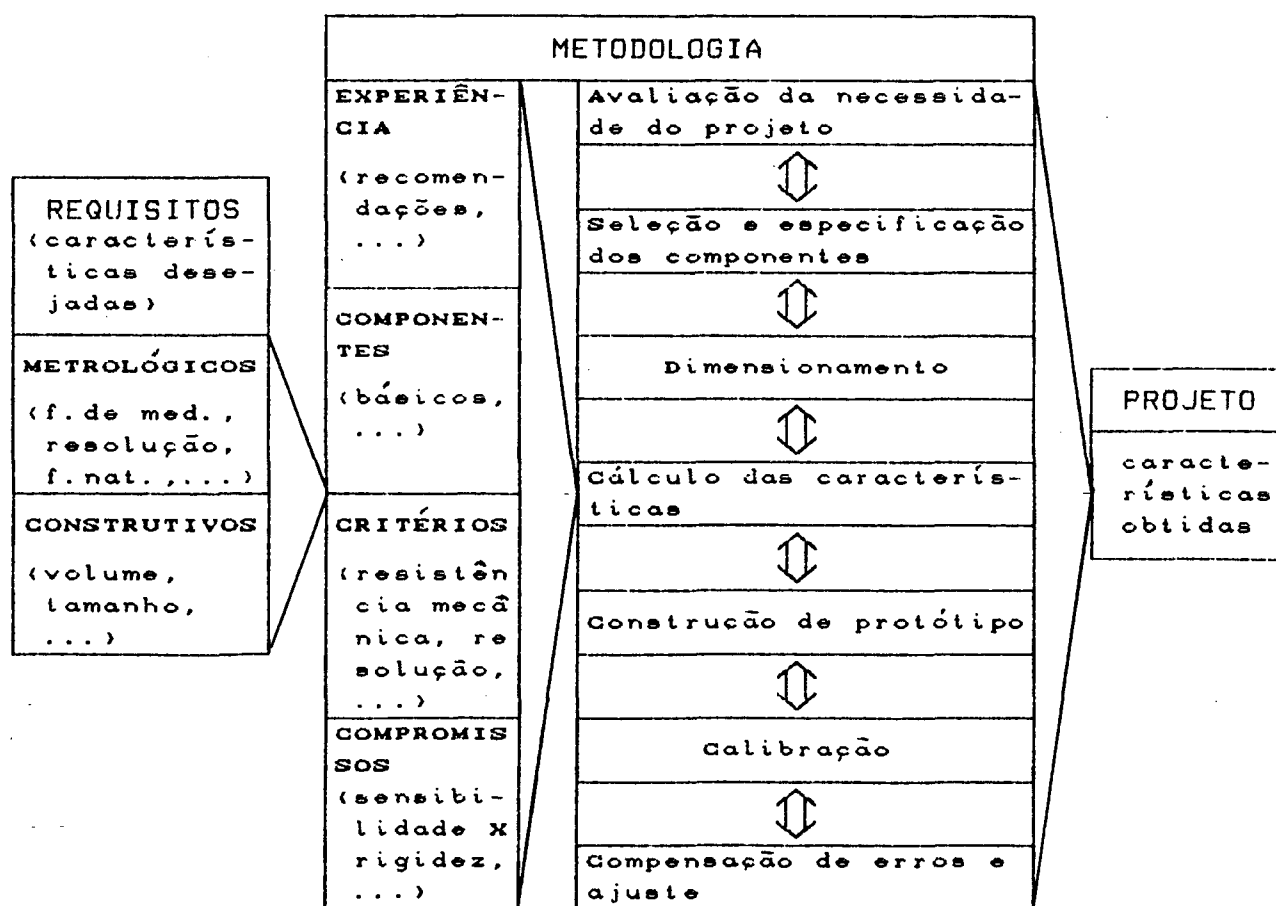


Fig. 4.1 - O problema de projeto de transdutores com elemento elástico [12].

Esse roteiro é útil na análise das soluções candidatas, e o computador pode ser empregado em todas etapas. Mas, para a obtenção de projetos preliminares, nas quatro primeiras é que este encontra maior aplicação.

4.2 A ANÁLISE DAS SOLUÇÕES

A análise das soluções candidatas é realizada com base nos critérios adotados. Para isso são efetuados o cálculo das características do transdutor, a construção e testes de protótipos, conforme roteiro da figura 4.1.

Com a finalidade de implantar a análise via computador, adquire importância a previsão do comportamento do transdutor, através do cálculo de suas características, baseado em modelos matemáticos.

A descrição do comportamento dos transdutores, por meio de modelos matemáticos, é uma tarefa extremamente difícil porque, além da grandeza a medir, atuam sobre eles outras grandezas que interferem ou modificam seu comportamento. Essas grandezas indesejáveis são causadas por ações ambientais, componentes espúrias da grandeza a medir, interação com o sistema sob medição.

Para a formulação dos modelos matemáticos, comumente são realizadas as seguintes simplificações:

- Desenvolver modelos para cada submódulo (elemento elástico ou conversor elétrico) do transdutor;
- Tratar separadamente os comportamentos estático e dinâmico;
- Prever modelos teóricos lineares;
- Desconsiderar efeitos ambientais na formulação desenvolvida;
- Analisar a influência de cada fator interferente ou

modificador, separadamente.

Os modelos matemáticos, para obter a formulação de transdutores, classificam-se em [2]:

- Modelos funcionais;
- Modelos físicos.

Nos modelos funcionais, as relações entre excitação e resposta são descritas por parâmetros discretos, sem qualquer correspondência entre características físicas particulares do transdutor e características particulares do modelo. Eles representam modelos dinâmicos baseados em equações diferenciais totais (o tempo é a variável independente). No caso de transdutores com elemento elástico, o modelo linear, idealizado para o comportamento dinâmico do elemento elástico, é descrito pela clássica equação massa-mola-amortecedor [33,35].

Os modelos físicos relacionam o comportamento do transdutor com sua construção (geometria e propriedades do material do elemento elástico, ou propriedades dos conversores elétricos). São baseados em equações diferenciais parciais da física matemática e aplicados na análise detalhada de projeto do transdutor ou de seus submódulos. Um exemplo de modelo físico é a equação diferencial das placas [88], aplicáveis como elemento elástico tanto em transdutores de força quanto de pressão.

Uma característica que permite quantificar a validade dos dois tipos de modelo matemático é o erro de avaliação. Enquanto nos modelos físicos pode-se obter erros de avaliação pequenos (iguais ou menores do que 10% [10] ou até 4% [1]), em relação aos resultados experimentais, nos modelos funcionais esses erros são da ordem de 10 - 20% [2].

Assim, os modelos físicos, baseados em formulação analítica,

servem para o projeto dos transdutores considerados nesta tese, porque relacionam as características destes com a geometria e propriedades do material do elemento elástico, e com as propriedades dos conversores elétricos. Além disso, podem resultar erros de avaliação relativamente pequenos.

4.3 CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS

Neste item, apresenta-se uma revisão da formulação analítica empregada para o cálculo de um grupo de características comuns aos transdutores eletro-mecânicos.

A terminologia que se procura seguir, pertinente a tais características, é a recomendada pela ISO [55], também traduzida para o português pelo INMETRO [95].

4.3.1 Princípios da formulação analítica

A formulação analítica que se apresenta está fundamentada na mecânica dos corpos elásticos e nos princípios de conversão da deformação em sinal elétrico, conforme ilustrado na figura 4.2. As expressões básicas são as das tensões, deformações específicas e deslocamentos nos elementos elásticos, porque a partir delas são deduzidas as das demais características.

4.3.2 Tensões, deformações e deslocamentos nos elementos elásticos

Para o cálculo dessas características, as expressões que se encontram na bibliografia [22,34,77,88] são obtidas de modelos matemáticos, baseados em hipóteses simplificativas, e têm suas

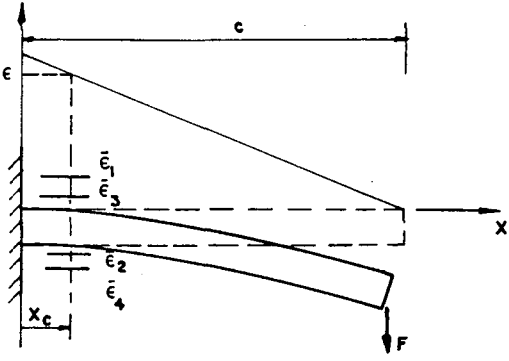
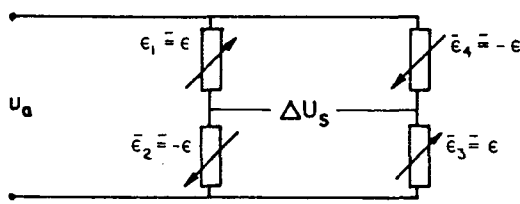
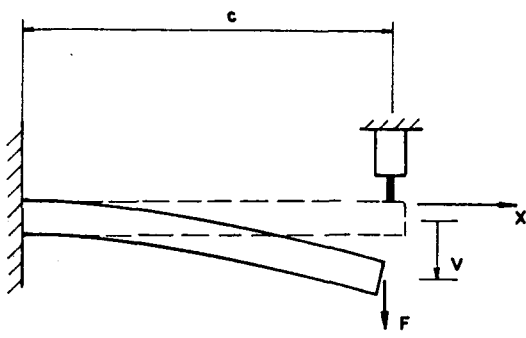
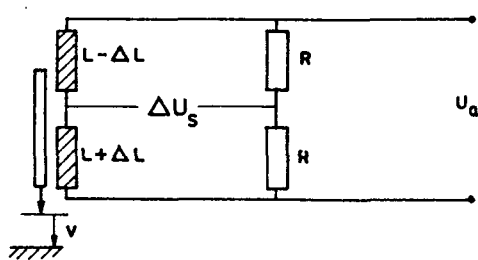
Princípio extensométrico	Princípio indutivo
  $S_\epsilon = \frac{\bar{\epsilon}}{F} = \left(\frac{\bar{\epsilon}_1 - \bar{\epsilon}_2 + \bar{\epsilon}_3 - \bar{\epsilon}_4}{F} \right) \approx \frac{2f_p \epsilon}{F}$ $= 12f_p (c - x_c) / (b h^2 E)$ $S_c = S_g / 4 \quad (\text{valor conhecido})$ $S = S_\epsilon S_c$	  $S_v = \frac{v}{F} = \frac{1}{b} \frac{c^3}{h^3 E}$ $S_c = \text{valor conhecido}$ $S = S_v S_c$
ϵ : def. específica em $x=x_c$ (m/m) $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$: def. média em $x=x_c$ S_ϵ : sensibilidade de def. (m/m/N) S_g : sens. de conversão (V/V/m/m) S_c : sens. de cada ext. (Ω/Ω/m/m) $f_p = \begin{cases} 1, \text{meia ponte de Wheatstone} \\ 2, \text{ponte de W. completa} \end{cases}$	R : resistência interna (Ω) L : autoindutância (H) v : deslocamento em $x=c$ (m) S_v : sens. de desloc. (m/N) S_c : sens. de conversão (V/V/m)
c : comprimento da viga (m) b : largura da viga (m) h : altura da viga (m) E : módulo de elasticidade do material da viga (N/m ²) F : carga aplicada (N) S : sensibilidade do transdutor (V/V/N) X_s : sinal de saída relativo (V/V)	
$X_s = \Delta U_s / U_a = S F$	

Fig. 4.2 - Exemplos de princípio de funcionamento de transdutores elétricos com elemento elástico (formulação linear).

limitações. As simplificações e limitações mais comuns são:

- Material homogêneo e isotrópico;
- Carregamentos simétricos;
- Tensões abaixo do limite de proporcionalidade;
- Cisalhamento desconsiderado no deslocamento de elementos à flexão;
- Tensões normais desprezadas ao longo da espessura de vigas ou placas.

O conhecimento das tensões é necessário para determinar as deformações específicas, através de relações conhecidas, e principalmente para o dimensionamento dos elementos elásticos, tanto em cargas estáticas quanto dinâmicas.

4.3.3 Posição dos conversores elétricos

A posição dos conversores que transformam deslocamento em sinal elétrico, como no exemplo dos indutivos da figura 4.2, é o lugar do elemento elástico onde ocorre o maior deslocamento, quando sobre ele atua a grandeza mecânica que está sendo medida. Para um elemento elástico em forma de placa circular, utilizado num transdutor de pressão, o conversor de deslocamento deve ser posicionado no centro da placa.

No posicionamento dos conversores de deformação específica, convém escolher regiões de pouco efeito da sua sensibilidade transversal, deixar todos num mesmo nível de deformação e tornar esse nível o mais alto do elemento elástico [49]. Restrições que podem dificultar essas ações são o espaço requerido para montar os conversores e a necessidade de cumprir o princípio de Saint Venant.

Nos elementos elásticos em forma de tubo, barra, anel ou vigas

do secção transversal uniforme, a posição dos conversores de deformação específica é facilmente conhecida (ver figura 4.2). Mas, no caso de vigas com secção variável, placas ou diafragmas, é necessário determinar a distribuição de deformações sobre a superfície do elemento, a fim de obtê-la.

A importância do correto posicionamento dos conversores elétricos de deformação específica pode ser constatada ao comparar os respectivos valores de não-linearidade experimental obtidos em [80] e [10], para um mesmo tipo de protótipo de transdutor de força, com elemento elástico da forma de placa circular. Em [80], obteve-se 1.3 %VF (valor final da faixa de medição). Uma das razões que contribuíram para esse elevado valor, indubitavelmente, é a posição inapropriada dos extensômetros. Em [10], obteve-se 0.3 %VF, onde a parcela dependente da posição dos extensômetros é da ordem de 0.06 %VF.

4.3.4 Sinal de saída e sensibilidade

Os conversores de deformação em sinal elétrico muitas vezes são arrançados em circuito ponte de Wheatstone, como é o caso dos exemplos da figura 4.2, onde U_a (V) denota a alimentação e o sinal de saída relativo X_e (V/V) foi determinado em função da sensibilidade S (V/V/N) e da amplitude F (N) da faixa de medição de forças (0...F). Nos transdutores de mesmo princípio, usados para medir outras grandezas mecânicas, o sinal de saída X_s é determinado analogamente por

$$X_s = S X_e \quad (4.1)$$

onde S é dado em (V/V/unidade da grandeza a medir) e X_e representa a amplitude da faixa de medição.

A sensibilidade dos transdutores eletro-mecânicos basicamente é o produto de duas sensibilidades independentes, uma de deformação do elemento elástico e outra de conversão elétrica. Assim, em projetos onde se estabelece o critério da máxima sensibilidade, escolhem-se os conversores elétricos apropriados e o problema reduz-se à maximização da sensibilidade de deformação.

O aumento da sensibilidade de deformação implica na diminuição da rigidez do elemento elástico. Essa relação contraditória tem influência na otimização de outras características. Entre elas estão a não-linearidade e a frequência natural, que obviamente também diminuem junto com a rigidez.

4.3.5 Não-linearidade

A relação linear da expressão (4.1) efetivamente não ocorre na prática, mesmo considerando que X_s dependa exclusivamente de X_e . Nesta condição, a relação entre ambos muitas vezes é expressa na forma [24,40]

$$X_s = a_0 + a_1 X_e + a_2 X_e^2 + \dots \quad (4.2)$$

apropriada para definir a não-linearidade de X_s em relação a uma reta de referência, dentro da faixa de medição. Sendo a reta de referência dada por

$$X_{s0} = b_0 + b_1 X_e \quad (4.3)$$

então a não-linearidade $N (X_e)$ é definida como

$$N (X_e) = X_s - X_{s0} \quad (4.4)$$

Usualmente a não-linearidade é quantificada em termos do valor máximo de $N (X_e)$, expresso como uma porcentagem da amplitude do

signal de saída.

Dependendo da reta de referência, são possíveis várias definições da não-linearidade, que pode ser classificada como independente ou terminal. Na não-linearidade independente a reta de referência pode ser ajustada por regressão (método dos mínimos quadrados), quando se dispõe de dados de calibração [35,93]. Na não-linearidade terminal a reta de referência costuma ser dada como:

- Linha reta passando pelos pontos correspondentes aos valores extremos da faixa de medição [24 , 53 , 72, 93 , 99] (não-linearidade de ponto extremo);
- Linha reta ajustada ou não por regressão, correspondente aos dois primeiros termos do polinômio em (4.2) , $(X_s = a_0 + a_1 X_e)$ [33,58].

Este último tipo de reta de referência define o que se denomina nesta tese de não-linearidade terminal extrema η [13] , deduzida ao arranjar (4.2) na forma

$$X_s = a_0 + S_0 X_e (1 + \eta) \quad (4.5)$$

onde

$$\eta = \frac{S_1}{S_0} X_e + \frac{S_2}{S_0} X_e^2 + \dots \quad (4.6)$$

S_0 é a sensibilidade linear estática, S_1 , S_2 , ... sensibilidades de ordem superior, a_0 desvio do zero.

Nos transdutores com elementos elásticos, geralmente o valor máximo de η ocorre no ponto correspondente ao valor final da faixa de medição. Daí a denominação adotada.

A expressão (4.5), com $a_0=0$, é a forma predominante na bibliografia [33,58] , para a representação analítica da

não-linearidade.

Uma das simplificações comuns, para o cálculo dessa característica, consiste em separar o elemento elástico e os conversores elétricos. Assim, podem ser tratadas não-linearidades mecânica η_m e elétrica η_e , de modo que

$$\eta \cong \eta_m + \eta_e \quad (4.7)$$

A não-linearidade de origem elétrica η_e depende principalmente das propriedades dos conversores elétricos, do arranjo deles em relação ao elemento elástico e do circuito de ligação [20,28,58]. Para conversores extensométricos, arranjados em ponte de Wheatstone, a formulação correntemente usada [33,58] é suficientemente correta. Uma expressão com boa aproximação deduz-se facilmente de [58], como

$$\eta_e \cong - \frac{1}{2} (\bar{\epsilon}_1 + \bar{\epsilon}_2 + \bar{\epsilon}_3 + \bar{\epsilon}_4) S_g \quad (4.8)$$

onde $\bar{\epsilon}_1, \bar{\epsilon}_2, \bar{\epsilon}_3, \bar{\epsilon}_4$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) são as deformações específicas médias e S_g ($\Omega/\Omega/\text{m}/\text{m}$) a sensibilidade de cada extensômetro. Os conversores de deslocamento geralmente têm η_e especificado.

A não-linearidade de origem mecânica η_m depende de fatores tais como comportamento carga-deformação do material do elemento elástico, de desvios da linha de ação de cargas, da mudança das condições de contorno em função da carga aplicada, de tensões de membrana que se tornam consideráveis em placas, quando o deslocamento for relativamente grande [20,28,59,69]. Supondo que η_m dependa somente da geometria do elemento elástico e das condições de contorno e carregamento, define-se [13]

$$\eta_m = \frac{v_r}{v_0} - 1 \quad (4.9)$$

onde v_r (mm) é o deslocamento efetivo e v_0 (mm) o deslocamento linear clássico, calculados para o mesmo lugar do elemento elástico onde ocorrem seus maiores valores.

A determinação analítica de v_r não é um problema simples, principalmente quando o elemento elástico apresentar secção transversal ou espessura variáveis. Na bibliografia são encontradas fórmulas para as formas básicas mais simples como vigas carregadas simultaneamente à flexão e à tração ou compressão axiais [77]; vigas carregadas à flexão com as extremidades impedidas de deslocar-se horizontalmente [34]; vigas em balanço, onde o braço do momento muda com a aplicação da carga [47]; placas circulares sob pressão lateral, com grandes deflexões [77,88]; placas circulares sob carga lateral aplicada no seu centro, com grandes deflexões [88].

As placas circulares provavelmente são os elementos mais pesquisados, pois ainda recentemente são apresentados artigos estudando o problema das grandes deflexões, tanto empregando métodos numéricos [66], quanto soluções analíticas aproximadas [36].

Essas soluções analíticas dão resultados de η_m com boa aproximação [10,28,61], dentro dos seus limites usuais (até aproximadamente 4% do valor final da faixa de medição [33]).

4.3.6 Frequência natural dos elementos elásticos

Em qualquer sistema mecânico, sob ação de cargas dinâmicas, é fundamental o conhecimento da frequência natural. A determinação analítica dessa frequência não é um problema simples, pois as condições, sob as quais atuam as cargas, podem apresentar-se bem

diversificadas. Assim, podem ocorrer oscilações com o elemento elástico interagindo com fluídos [32,45,46], como é o caso típico dos transdutores de pressão, de transdutores de força para medir cargas submersas [64], ou ainda líquidos envolvendo o elemento elástico simplesmente para aumentar o amortecimento no transdutor, como em alguns acelerômetros. Outro problema particular é o de determinar a frequência natural em transdutores de pressão que têm elementos elásticos associados, como viga e folo [68]. Nos casos de carga de impacto, a massa da base, onde se assenta o transdutor, influi na frequência natural [67].

Os transdutores com elemento elástico, nas suas aplicações mais gerais, são modelados pelo clássico sistema linear de segunda ordem massa-mola-amortecedor [33,35,40]. O seu comportamento dinâmico é caracterizado pela constante de amortecimento e pela frequência natural [40].

A frequência natural é determinada analiticamente admitindo-se que a constante de amortecimento seja nula, o que na prática é válido, pois o fator de amortecimento estrutural é da ordem de 0.02 [33]. Além disso, a formulação analítica é obtida, muitas vezes, com simplificações tais que o valor esperado de cálculo serve apenas como uma estimativa preliminar de projeto. Por isso a determinação do seu valor mais correto e confiável tem sido preferida através de métodos experimentais [64].

Em [77] são encontradas as expressões de cálculo da frequência natural dos elementos elásticos uniformes, sob carregamentos e condições de contorno que podem representar os tipos de transdutores considerados neste trabalho. Para elementos de geometria não-uniforme, necessita-se usar formulação analítica aproximada.

Particularmente nos transdutores de força uniaxial, montados sobre base rígida, onde são empregadas diversas formas com dimensões variáveis de elementos elásticos, é utilizada a seguinte expressão geral para cálculo aproximado da frequência natural f_n (Hz) [33,77]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{W/g + m_o + m_t/3}} \quad (4.10)$$

Nesta expressão C (N/m) é a constante de mola, W (N) a carga aplicada, g (m/s^2) aceleração da gravidade, m_o (kg) massa oscilante e não deformável do elemento elástico, m_t (kg) massa oscilante e deformável do elemento elástico. Assim, num elemento elástico tipo placa circular, o ressalto central para aplicar a força é suposto rígido e sua massa tem valor m_o , enquanto o material restante do modelo da placa tem massa m_t .

Em muitas aplicações, $(m_o + m_t/3) \ll W/g$ e tem sido usada a expressão [40]

$$f_n \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C g}{W}} \quad (4.11)$$

Quando W tiver o valor máximo permitido, tem-se uma frequência natural com valor mínimo. Nota-se que, deste modo, em um mesmo elemento elástico, ocorrem diferentes valores de f_n , para diferentes valores de W . Por isso tem sido usada também uma expressão com $W=0$ que dá uma frequência natural com valor máximo, caracterizando univocamente o elemento elástico. Assim, tem-se uma frequência natural f_{no} , sem carga, obtida de

$$f_{no} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m_o + m_t/3}} \quad (4.12)$$

A frequência natural é usada no cálculo analítico aproximado do erro dinâmico da resposta de transdutores com elemento elástico,

quando estes forem excitados por sinais tipo rampa terminada ou senoidal [33,35]. Assim, com esse erro, pode-se estabelecer a faixa de frequência de operação do transdutor.

A frequência natural também é importante na determinação de uma característica relacionada com a informação dada pelo transdutor, a capacidade de canal, definida a seguir.

4.3.7 Resolução em sistemas digitais

A indicação de um sistema de medição é uma informação da grandeza que está sendo medida [42]. Essa informação é transmitida através dos módulos que compõem a sua estrutura e carrega os erros de cada um. A sua quantificação é abordada na Teoria de Informação da Medição [52,98].

Uma aplicação dessa teoria pode ser ilustrada ao considerar os fundamentos da conversão analógica-digital (A/D) apresentados por BENTLEY [24]. Na figura 4.3, representa-se a relação entre o sinal digital convertido X_s e o correspondente sinal analógico X_a . O número m de valores discretos (digitais) consecutivos (ou de amplitudes distinguíveis) é determinado por

$$m = \frac{X_{s5} - X_{s0}}{\Delta X_s} + 1 = \frac{\bar{X}_s}{\Delta X_s} + 1 \quad (4.13)$$

onde $\bar{X}_s = X_{s5} - X_{s0}$ é a amplitude da faixa de valores discretos e ΔX_s o intervalo entre eles.

O erro de conversão E_c (*quantisation error*) é definido [24] por

$$E_c = \pm \frac{\Delta X_s}{2} \quad (4.14)$$

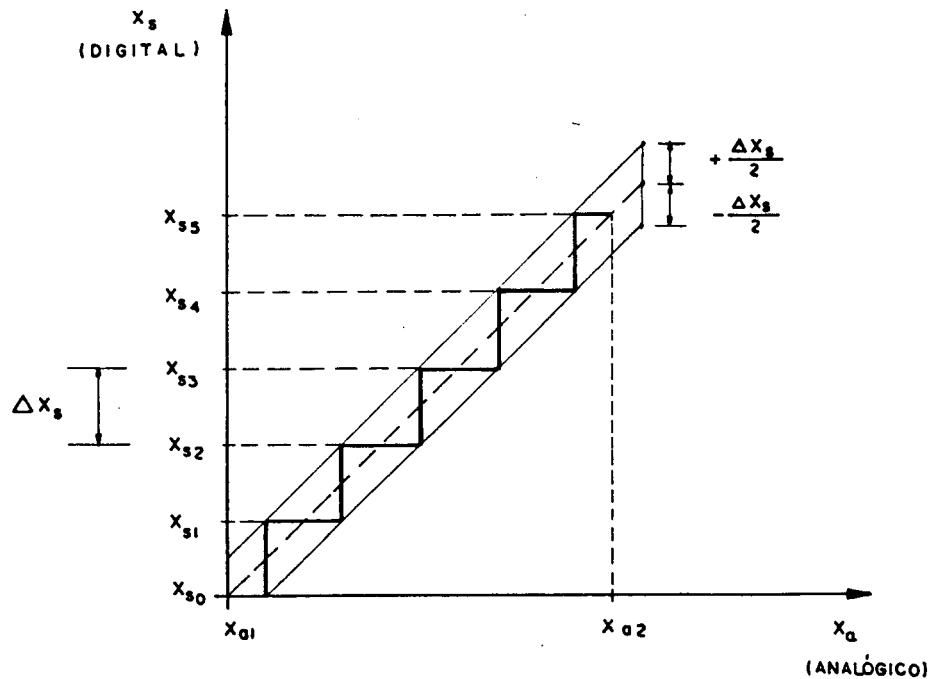


Fig.4.3-Relação entre sinal digital e analógico.

ou pelo seu valor relativo E_r , usando a expressão (4.13), tal que

$$E_r = \pm \frac{\Delta X_s / 2}{\bar{X}_s} = \pm \frac{1}{2(m-1)} \quad (4.15)$$

Observa-se que ΔX_s é um exemplo de resolução de elementos cujo sinal de saída varia em intervalos discretos, em resposta a um sinal de entrada contínuo. Mas, considerando as restrições impostas por instabilidade elétrica e de construção dos transdutores, a menor variação da grandeza a medir que pode ser detectada pelo sistema de medição, a sua resolução R , é [13]

$$R \geq \Delta X_s \quad (4.16)$$

A resolução relativa R_r conseqüentemente vale

$$R_r \geq \frac{\Delta X_s}{\bar{X}_s} = \frac{1}{m-1} \quad (4.17)$$

Dessa expressão obtém-se que

$$m \geq \frac{1}{R_r} + 1 \quad (4.18)$$

4.3.8 Quantidade de informação e capacidade de canal

Conforme a Teoria de Informação da Medição, nas medições estáticas e usando transdutores com sinal de saída analógico, a máxima quantidade de informação q (em bit) que pode ser detectada vale

$$q = \log_2 m = 3.32 \log_{10} m \quad (4.19)$$

Nas medições dinâmicas, requer-se a transmissão da maior quantidade de informação por unidade de tempo. Esse tipo de informação é quantificado pela capacidade de canal C_T (bit/s).

$$C_T = 2 f_g q \quad (4.20)$$

onde f_g (Hz), segundo WOSCHNI [98], é a mais alta frequência ainda indicada corretamente por sistemas de medição com conversão A/D. Nos transdutores eletro-mecânicos, seu valor máximo é limitado pela frequência natural.

Nota-se que, para aumentar a quantidade de informação, convém diminuir o erro relativo. Isso requer o uso de transdutores mais caros. Assim, os erros devem ser mantidos a níveis compatíveis com exigências e custos.

A máxima quantidade de informação que pode ser detectada, usando transdutores com elementos elásticos, é limitada por três grupos de restrições:

- Propriedades mecânicas do material do elemento elástico (resistência mecânica);
- Propriedades dos conversores elétricos (máximos deslocamento

ou deformação específica permitidos);

- Restrições de características de projeto (sinal de saída padronizado, rigidez limitada,...).

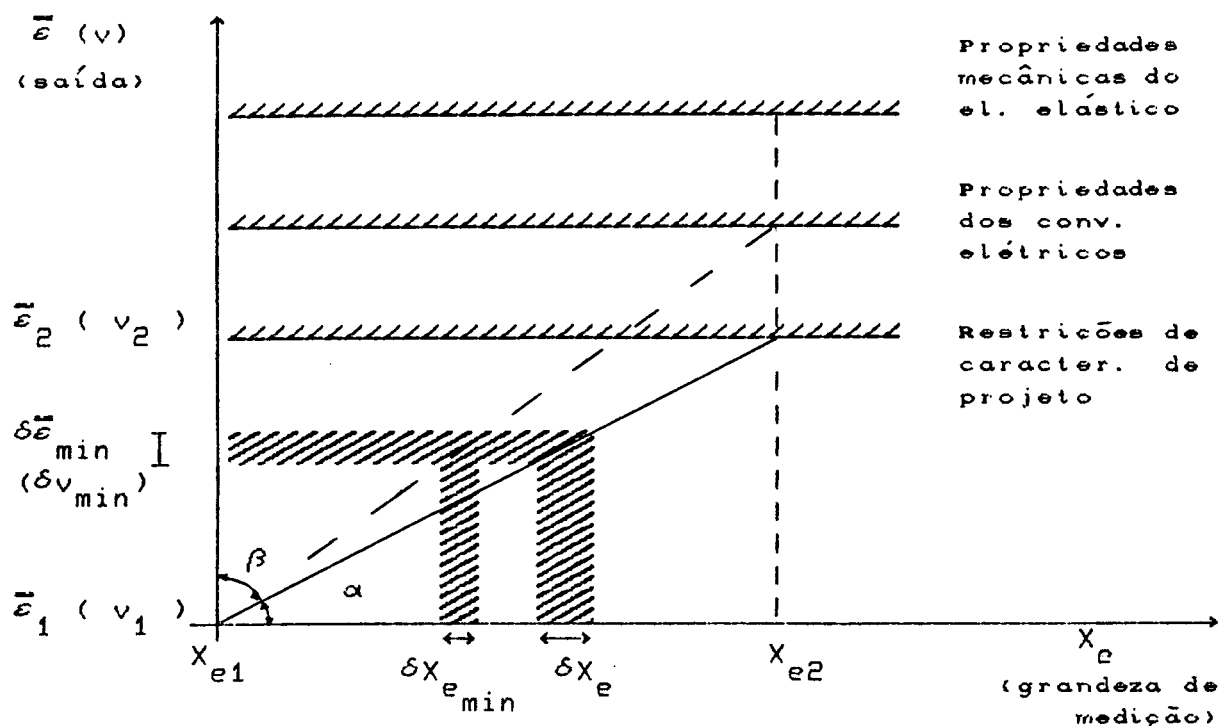
Esses grupos são mostrados na figura 4.4 e determinam o valor máximo da deformação de saída (deformação específica aparente máxima $\bar{\epsilon}_2$, usualmente obtida em ponte de Wheatstone, ou deslocamento v_2).

O valor máximo da deformação pode ser imposto por restrições de resistência do material do elemento elástico ou por propriedades dos conversores elétricos. No caso dos transdutores extensométricos, em cargas cíclicas, seu valor é imposto pela tensão limite de fadiga do material do elemento elástico e, para carregamentos estáticos, geralmente pela máxima deformação específica permitida no extensômetro resistivo.

Mas o valor máximo da deformação de saída, em geral, é estabelecido em função de restrições de características de projeto tais como valores máximos permitidos de resolução, sinal de saída relativo, não-linearidade, deslocamento, valor máximo permitido de frequência natural.

4.3.9 Resolução de transdutores com elemento elástico

Admitindo-se uma variação mínima de deformação ($\delta\bar{\epsilon}_{\min}$ ou δv_{\min}) que pode ser tratada, considerando os erros aleatórios do sistema de medição, e com a deformação máxima de saída $\bar{\epsilon}_2$ (ou δv_2), define-se uma resolução de saída do elemento elástico $R_r = \delta\bar{\epsilon}_{\min}/(\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1)$ ou $R_r = \delta v_{\min}/(v_2 - v_1)$, que será mínima quando $\bar{\epsilon}_2$ ou v_2 forem determinados pelas propriedades dos elementos elásticos e dos conversores elétricos.



$\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2$ (ou v_1, v_2), X_{e1}, X_{e2} : limites de faixa de medição

$\delta\bar{\varepsilon}_{\min}$ (ou δv_{\min}), $\delta X_{e\min}$, δX_e : resoluções

$\beta = \tan^{-1} K$ $\alpha = \tan^{-1} S$

S ($S = S_e$ ou $S = S_v$) : sensibilidade

K : rigidez

Fig. 4.4 - Restrições limitantes das características dos transdutores com elemento elástico.

Para uma exigência de projeto, onde se requer que essa resolução R_r seja fixa, obtêm-se as seguintes conclusões, óbvias do ponto de vista matemático, mas de grande valia prática, ao observar a figura 4.4:

- A resolução relativa pode ser determinada igualmente por $R_r = \delta X_e / X_e$, onde $X_e = X_{e2} - X_{e1}$ é a amplitude da faixa de valores da grandeza a medir, e δX_e a resolução absoluta de

entrada (ou a resolução do transdutor);

- O produto da sensibilidade multiplicada pela amplitude da faixa de valores da grandeza a medir é constante, ou seja,

$$S_e = \frac{\delta \bar{e}_{\min}}{\delta X_e} = \frac{\bar{e}_2 - \bar{e}_1}{X_e} \longrightarrow S_e X_e = \bar{e}_2 - \bar{e}_1 = \text{constante} \quad (4.21)$$

$$S_v = \frac{\delta v_{\min}}{\delta X_e} = \frac{v_2 - v_1}{X_e} \longrightarrow S_v X_e = v_2 - v_1 = \text{constante} \quad (4.22)$$

- O produto da sensibilidade multiplicada pela rigidez é constante.

$$S K = \text{constante}$$

- O produto da sensibilidade multiplicada pela resolução de entrada é constante.

$$S \delta X_e = \text{constante}$$

Portanto, com essas conclusões, comprovam-se matematicamente as relações de compromisso contraditórias:

- Sensibilidade versus faixa de medição ($X_{e1} \dots X_{e2}$);
- Sensibilidade versus resolução de entrada δX_e ;
- Sensibilidade versus rigidez e conseqüentemente
- Sensibilidade versus frequência natural.

Nas expressões (4.21) e (4.22) aparecem as sensibilidades $S_e = \delta \bar{e}_{\min} / \delta X_e$, $S_v = \delta v_{\min} / \delta X_e$ que podem ser determinadas arbitrando valores realizáveis na prática das resoluções $\delta \bar{e}_{\min}$, δv_{\min} e δX_e .

Uma característica auxiliar, para arbitrar tais valores, é a resolução relativa R_r , porque são conhecidos os limites de deformação (\bar{e}_2 , \bar{e}_1 ou v_2 , v_1) correspondentes à faixa de medição $X_{e1} \dots X_{e2}$.

Como sugerido em [13], a resolução relativa pode ser obtida indiretamente, através da quantidade de informação, por

$$q = \log_2 \left(\frac{1}{R_r} + 1 \right) \quad (4.23)$$

As resoluções absolutas de entrada δX_e e mínima de saída δX_{\min} (ou δv_{\min}) podem ser empregadas como critério de projeto, fixando uma resolução de entrada $\delta X_e \geq \delta X_{e\min}$, onde $\delta X_{e\min}$ é o valor mínimo obtido em função dos limites das propriedades mecânicas do elemento elástico e características dos conversores (figura 4.4). Assim, determina-se a sensibilidade ($S_e = \delta \bar{\epsilon}_{\min} / \delta X_e$ ou $S_v = \delta v_{\min} / \delta X_e$) e o dimensionamento do elemento elástico é feito com sua expressão matemática.

4.3.10 Características de efeitos ambientais

Os efeitos ambientais sobre um sistema de medição são particularmente importantes nas medições estáticas, porque constituem fontes perturbadoras que alteram o sinal produzido pelo transdutor, desviando o zero inicial e a sensibilidade.

A sua representação analítica, considerando apenas valores de primeira ordem, é incluída na expressão do sinal de saída como segue [24].

$$X_s = (a_0 + S_I X_I) + (S_0 + S_M X_M) X_e + N(X_e) \quad (4.24)$$

onde

X_I : variação da grandeza ambiental interferente,

X_M : variação da grandeza ambiental modificadora,

S_I : sensibilidade interferente (ou erro no zero),

S_M : sensibilidade modificadora (ou erro na sensibilidade).

Os erros interferentes ou modificadores são de difícil previsão teórica. Geralmente as expressões analíticas para calculá-los são corrigidas ou determinadas experimentalmente.

Variações de temperatura causam erros simultâneos de interferência e modificadores, e sempre estão presentes em transdutores com elemento elástico. A maioria das expressões obtidas na bibliografia não estão adaptadas para a expressão (4.24) e as encontradas tratam de efeitos da temperatura relacionados ao elemento elástico [39,70,76,79] e aos conversores elétricos [39,79,89].

Outras fontes de erros ambientais são variações da pressão atmosférica, umidade do ar e vibrações [79]; componentes espúrias em transdutores de força [29,62].

4.3.11 Formulações analíticas corrigidas

O uso de expressões analíticas aproximadas tem a importante vantagem da rapidez de cálculo das tensões, deformações específicas e deslocamentos em elementos elásticos. Por outro lado, a confiabilidade delas depende do modelo matemático adotado, havendo necessidade de comparação com outros resultados tendo erros de avaliação conhecidos.

Resultados experimentais são aceitos como padrão de referência e têm sido empregados para a correção da formulação analítica [28].

A formulação analítica também pode ser corrigida, adotando resultados de métodos numéricos como boa referência de comparação [4,29] e empregando técnicas de análise dimensional.

Em [10] apresenta-se a correção das formas adimensionais das expressões das deformações específicas e deslocamentos, adaptadas de [77]. Para obter valores toleráveis de correção, utilizou-se um pacote comercial de elementos finitos [14] e a técnica adotada foi multiplicar aquelas formas adimensionais por grupos de funções.

Cada função é um polinômio ajustado por regressão, o qual depende de uma única relação adimensional geométrica, entre as usadas.

ABDULLAH e RAHMAN [4] descrevem o emprego de técnicas de análise dimensional para formar grupos adimensionais, utilizados na construção de curvas de desempenho de uma classe de diafragmas. Os dados para construção das curvas de desempenho desses elementos, usados em transdutores de pressão, foram gerados por um programa específico e interativo de elementos finitos, baseado no modelo de equações não-lineares, deduzidas por NOVOZHILOV [4], para cascas delgadas. O interesse era implementar um programa computacional simples e de pequeno porte, empregando tais curvas para o dimensionamento dos diafragmas.

4.4 FORMULAÇÃO PARA ELEMENTOS ELÁSTICOS DE TRANSDUTORES DE FORÇA

A revisão apresentada no item anterior fornece um grupo de características de transdutores eletro-mecânicos que podem ser usadas no dimensionamento e análise das soluções de projeto. Porém, as expressões indicadas são gerais e independem das formas dos elementos elásticos. Uma formulação que as considere torna-se ampla e envolve deduções relativas às particularidades de cada uma e de cada tipo de transdutor.

Nesta tese, as fórmulas desenvolvidas para o cálculo de tensões, deformações específicas e deslocamentos, em elementos elásticos uniformes, foram adaptadas das encontradas na bibliografia, empregando fatores que consideram elementos básicos montados em série ou paralelo, e tipos de condições de contorno para vigas básicas. Os mesmos fatores foram usados para elementos não-uniformes, cujas expressões de tensões, deformações específicas

e deslocamentos, no entanto, tiveram de ser deduzidas.

A formulação aproximada, deduzida para esses elementos elásticos, distingue-se por ter sido desenvolvida em termos de elementos básicos uniformes de referência (viga prismática, de secção transversal retangular, em balanço, com uma força aplicada em sua extremidade livre, é um exemplo de elemento básico uniforme de referência). Assim, têm-se modelos onde a tensão máxima, por exemplo, é expressa pelo produto da tensão máxima do elemento de referência, com um grupo de parâmetros adimensionais, ou relativos, e os fatores de montagem e condições de contorno.

A idéia dos elementos de referência foi usada na dedução da não-linearidade mecânica, em elementos elásticos não-uniformes, transformando-os em elementos uniformes equivalentes, através do princípio da energia de deformação equivalente. Com isso, aplicaram-se as expressões aproximadas que tiveram de ser deduzidas para elementos uniformes.

No desenvolvimento dos modelos básicos, desprezou-se a influência de características ambientais. A única característica ambiental a ser considerada é o calor gerado em extensômetros resistivos colados, com a finalidade de auxiliar a sua seleção.

A formulação analítica deduzida é essencial para a implementação do programa computacional de projeto de elementos elásticos. Devido à grande quantidade de detalhes envolvidos, ela é extensa. Assim, preferiu-se apresentá-la no anexo B.

Os critérios de projeto, a serem empregados no programa computacional, são resumidos em:

- Resistência mecânica;
- resolução de entrada desejada;
- Sinal de saída fixo a um valor previamente estabelecido ,

correspondente ao valor final da faixa de medição;

- Sinal de saída máximo possível;
- Deslocamento fixo a um valor predeterminado, correspondente ao valor final da faixa de medição;
- Deslocamento mínimo;
- valores fixos ou limitados de carga de falha estática, carga de falha por fadiga, frequência natural, não-linearidades mecânica e elétrica, quantidade de informação, capacidade de canal, tamanho.

Entre eles destacam-se resolução de entrada, valores fixos ou limitados da quantidade de informação e capacidade de canal, por serem incomuns.

O critério de dimensionamento por resistência mecânica é utilizado considerando cargas estáticas. Para dimensionamentos sob carga cíclica, determina-se uma carga de fadiga como uma característica do elemento elástico, baseada em vida infinita, empregando a formulação de WALTON [96], e admitindo que os fatores redutores da tensão limite de fadiga do material tenham valores conservativos.

5. A SISTEMÁTICA DE PROJETO IMPLEMENTADA EM UM PROGRAMA COMPUTACIONAL

Nos capítulos anteriores foram abordados assuntos relativos ao princípio de construção, metodologia e projeto dos transdutores eletro-mecânicos, que proporcionaram as bases para a implementação de um programa computacional, em microcomputador, com as seguintes características principais:

- Projeto preliminar de elementos elásticos de transdutores eletro-mecânicos;
- Inicialmente, uso de variações existentes de elementos elásticos (viga, placa circular, anel, barra, coluna, etc.);
- Uso de conversores extensométricos ligados em ponte de Wheatstone e conversores de deslocamento com sinal analógico;
- Associação das três técnicas de interatividade homem-computador: simulação linear, simulação modular e otimização;
- Desenhos armazenados e executados por procedimentos específicos;
- Propriedades de materiais de elementos elásticos armazenadas na forma de procedimentos específicos;
- Propriedades de conversores elétricos fornecidas pelo usuário;
- Uso de formulação analítica aproximada especialmente desenvolvida (adaptações de bibliografia e deduções);
- Variadas possibilidades de soluções de projeto, com base nos diferentes critérios empregados;

- Influências ambientais desprezadas, exceto a da temperatura, utilizada na seleção dos conversores extensométricos.

O programa computacional, implementado com tais características, denomina-se PEETE (Projeto de Elementos Elásticos para Transdutores Eletro-mecânicos). Ele foi codificado em linguagem PASCAL, basicamente pela facilidade de uso e pela disponibilidade de recursos de edição e gráficos na bibliografia. Esses recursos e os que tiveram de ser desenvolvidos contribuíram para torná-lo interativo e altamente auto-explicativo. Ele auxilia o projeto de elementos elásticos, através de duas importantes etapas:

- Avaliação da necessidade do projeto;
- Projeto preliminar.

A primeira etapa aplica-se a todos transdutores considerados nesta tese (força, pressão, torque, aceleração e deformação), usando os resultados do levantamento de transdutores existentes, apresentados no anexo A.

A segunda etapa aplica-se, por ora, aos transdutores de força uniaxial. Ela é a mais complexa e emprega os conhecimentos, as técnicas e a formulação desenvolvida, discutidos nos capítulos anteriores.

Neste capítulo são discutidos aspectos de interatividade, em relação à estrutura básica do PEETE; o procedimento de projeto preliminar; um exemplo de projeto usando o programa; e são comentadas as inovações introduzidas.

5.1 ASPECTOS GERAIS DE INTERATIVIDADE

Na figura 5.1 mostra-se a estrutura básica das atividades de

projeto do programa.

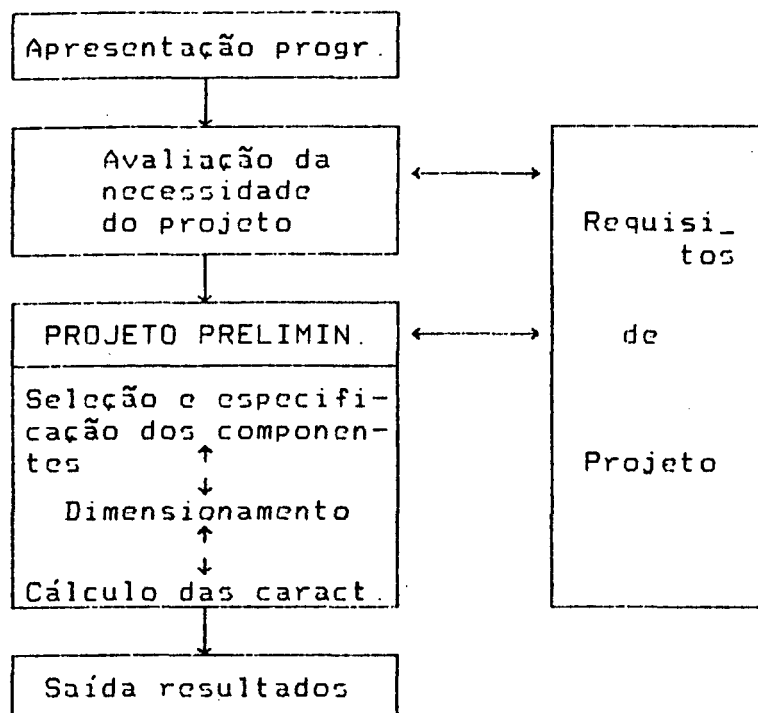


Fig. 5.1 - Estrutura básica das atividades de projeto do programa PEETE.

A primeira atividade (apresentação do programa) é uma descrição que inclui o conteúdo e consiste em:

- Identificar o programa, mostrando
 - . Grandezas a medir consideradas;
 - . Princípios usados para conversão da deformação em sinal elétrico;
 - . Resultados que se obtêm com o programa;
 - . Limitações do programa (modelos matemáticos, material, conversores elétricos);
- Descrever brevemente as etapas abrangidas no procedimento de projeto.

Essa apresentação pode ser dispensada, conforme se observa no fluxograma geral mostrado na figura 5.2, onde se nota também que

foi previsto um recurso para correção de desenhos distorcidos na tela do microcomputador.

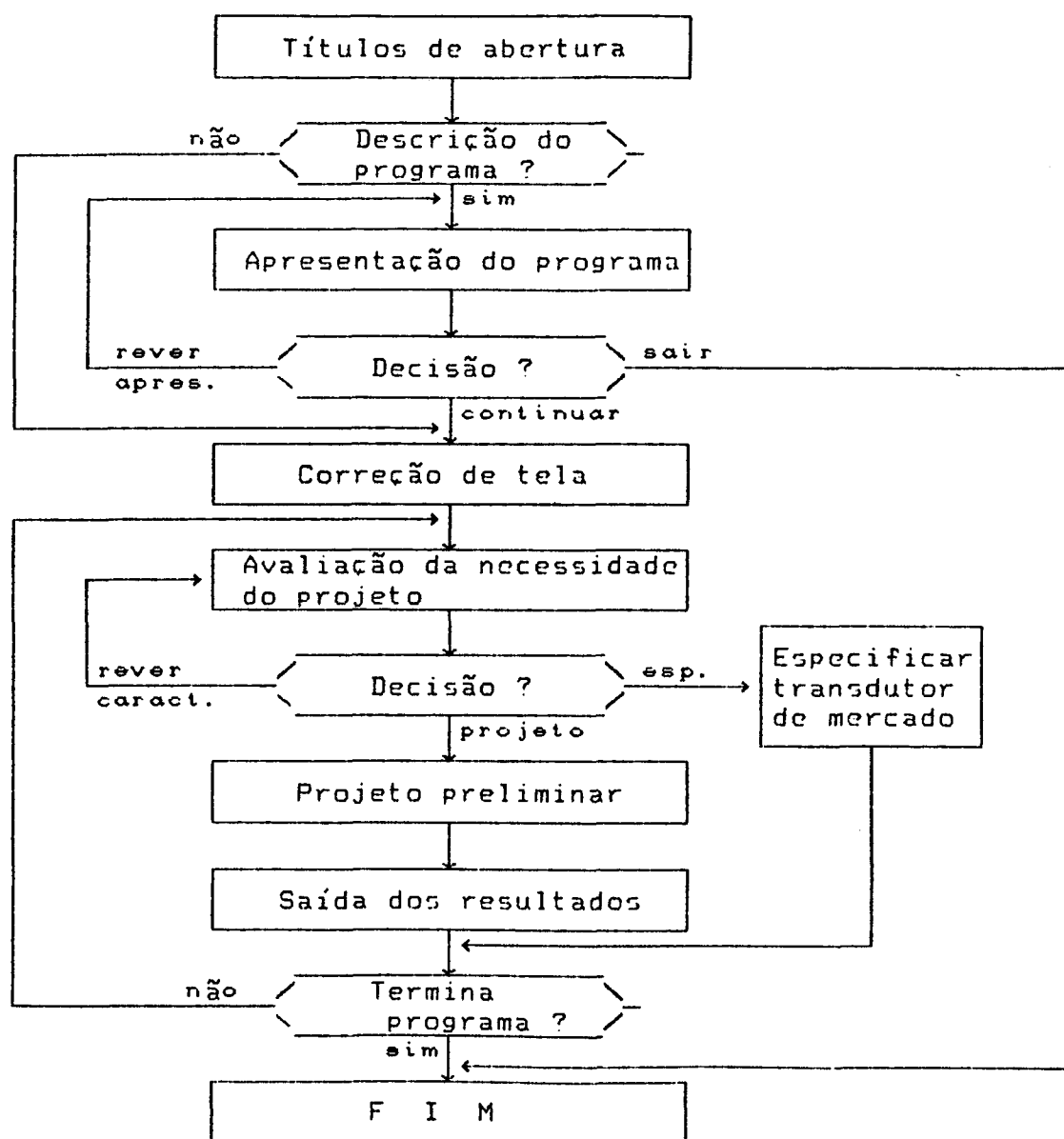


Fig. 5.2 - Fluxograma geral do programa PEETE.

Assim, a primeira atividade efetiva é a introdução dos requisitos do projeto. Optou-se pela sua entrada em várias etapas, conforme o projeto prossegue e de maneira direta ou indireta, utilizando os fatores limitantes envolvidos, sob julgamento do

usuário. Essa decisão facilitou a codificação e contribuiu acentuadamente para a interatividade do programa.

A interação é necessária na atividade de avaliação da necessidade do projeto (figura 5.1), quando se comparam aquelas características inicialmente desejadas com as de transdutores existentes (anexo A). Essa comparação tem a finalidade de auxiliar o usuário na decisão entre projetar um transdutor novo, ou especificar um de mercado (figura 5.2).

Na atividade de projeto preliminar, o usuário compara as características desejadas (requisitos) com as calculadas e apresentadas no PEETE, sendo sua a responsabilidade pelas decisões. Estas podem implicar em modificações tais como seleção de outra forma e material do elemento elástico, uso de outro princípio de conversão, alterar especificações dos conversores, alterar posição dos conversores, alterar carga e segurança, redimensionar, mudar critérios de projeto. Assim, também na atividade de projeto preliminar, existe a necessidade da interação homem-computador.

Aspectos detalhados de interatividade podem ser observados no exemplo de projeto do item 5.3.

5.2 PROCEDIMENTO DE PROJETO

Na estrutura básica da figura 5.1, mostra-se que o projeto preliminar do programa PEETE é dividido em três etapas iterativas: seleção e especificação dos componentes do transdutor, dimensionamento, cálculo das características.

A iteratividade é observada no fluxograma da figura 5.3, onde se detalha o projeto preliminar, e cujas três primeiras etapas correspondem à seleção e especificação dos componentes do

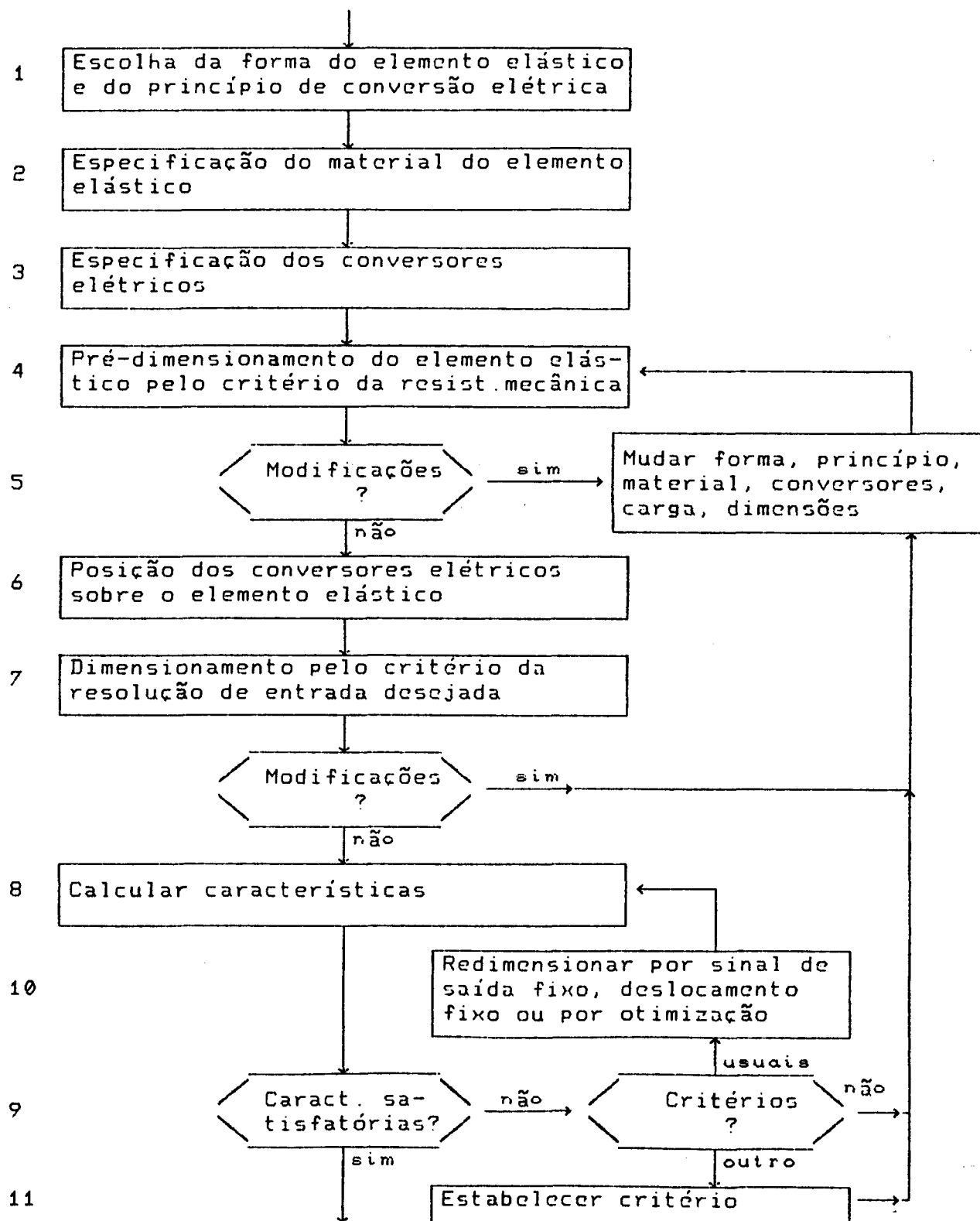


Fig. 5.3 - Fluxograma das etapas do projeto preliminar do elemento elástico.

Números fig. 5.3	Recursos disponíveis no PEETE para projeto preliminar	Figuras referidas
1	Tab. de formas básicas e caract. relacionadas. Menus de variações de formas básicas, princ. de conv. elétrica e cargas possíveis.	5.9 5.10
2	Tabela de materiais com números de valoração de algumas propriedades. Propriedades mecânicas dos materiais da tabela.	5.11 5.12
3	Ordem de seleção de conv. extens. resistivos. Tab. de dissipação térm. p/conv. ext. resist. Tab. orientativa de seleção de conv. indutivos.	5.13 5.14 —
4	Esboços das variações de elementos elásticos. Fórmulas para cálculo de tensões máximas.	5.16 Anexo B
5	Menu de alternativas para mudar forma, princ. de conv., mat. do el. elástico, especificação dos conv. elétricos, carga e dimensões.	5.16
6	Fórmul. p/cálculo e repres. de def. específicas. Esboços indic. posição dos conv. elétricos. Cursor simulando ext. resist. p/posicioná-los.	Anexo B 5.17 5.17
7	Fórmul. req. p/calcular sensibil. e resol. min. Fórmul. req. p/dimensionar cf/ resol. adotada.	Anexo B Anexo B
8	Fórmulas para cálculo de características. Apresentação de características calculadas.	Anexo B 5.18
9	Derivações de menus para decisões e alternativas de critérios de projeto.	5.19
10	Formulação básica para cálculo de características e dimensionamento.	Anexo B
11	Apresentação de características calculadas. Derivações de menus para decisões e alternativas de critérios de projeto.	5.18 5.19

Fig. 5.3a - Recursos disponíveis no PEETE para as etapas de projeto preliminar do elemento elástico.

Números fig. 5.3	Ações do usuário no projeto preliminar	Figuras referidas
1	Acionar tarja de escolha do el. elástico básico. Acionar tarjas de escolha do el. elástico e do princípio de conversão elétrica.	5.9 5.10
2	Acionar tarja de escolha do material ou Digitar informações de material não incluído no programa.	5.11 5.12
3	Digitar informações do conversor elétrico.	5.13 5.14 5.15
4	Digitar cargas, coef. de segurança e dimensões.	5.16
5	Acionar menu.	5.16
6	Acionar cursor gráfico para posicionar conver- sores extensométricos resistivos, no caso de variações de vigas e placas circulares.	5.17
7	—————	—————
8	Observar características calculadas.	5.18
9	Acionar menu.	5.18
10	Acionar menus e digitar informações decorrentes.	5.19
11	Observar características calculadas e acionar menus.	5.18 5.19

Fig. 5.3b - Ações do usuário, ao utilizar o PEETE, nas etapas de projeto preliminar do elemento elástico.

transdutor. Estas podem ser novamente requeridas, parcial ou integralmente, no dimensionamento e depois do cálculo das características.

Cada etapa do fluxograma envolve o uso de recursos disponíveis no programa e a ação do usuário. Estes estão esquematizados nos quadros das figuras 5.3a,b, onde constam uma numeração ordenada, em correspondência com o fluxograma, e referências a figuras ilustrativas do exemplo de projeto do item 5.3 e ao anexo B.

O procedimento de dimensionamento é ilustrado na figura 5.4, onde estão indicadas as características usadas para os critérios de projeto e onde se propõe, como um primeiro passo, um dimensionamento básico obrigatório, efetuado numa ordem rígida, justificada a seguir, e dimensionamentos opcionais.

O dimensionamento básico fornece o tamanho de elemento elástico obtido inicialmente pelo critério da resistência mecânica requerida (tensões abaixo do limite de escoamento) e necessário para o posicionamento dos conversores elétricos, inclusive considerando o tamanho destes. Além disso, ele fornece a resolução mínima, acima da qual estará a resolução desejada e usada no posterior dimensionamento pelo critério da resolução. Essa ordem rígida justifica-se pelo fato de que o dimensionamento pelo critério da resolução, com posterior verificação da resistência mecânica, poderia implicar no emprego de uma resolução desejada menor do que a mínima, sendo necessário escolher outra resolução desejada até satisfazer a condição de resistência mecânica, o que aumentaria o tempo de execução do programa.

No fluxograma da figura 5.3, observa-se que existe a possibilidade de dimensionamentos efetuados também sob critérios estabelecidos pelo usuário, empregando a opção de dimensionamento

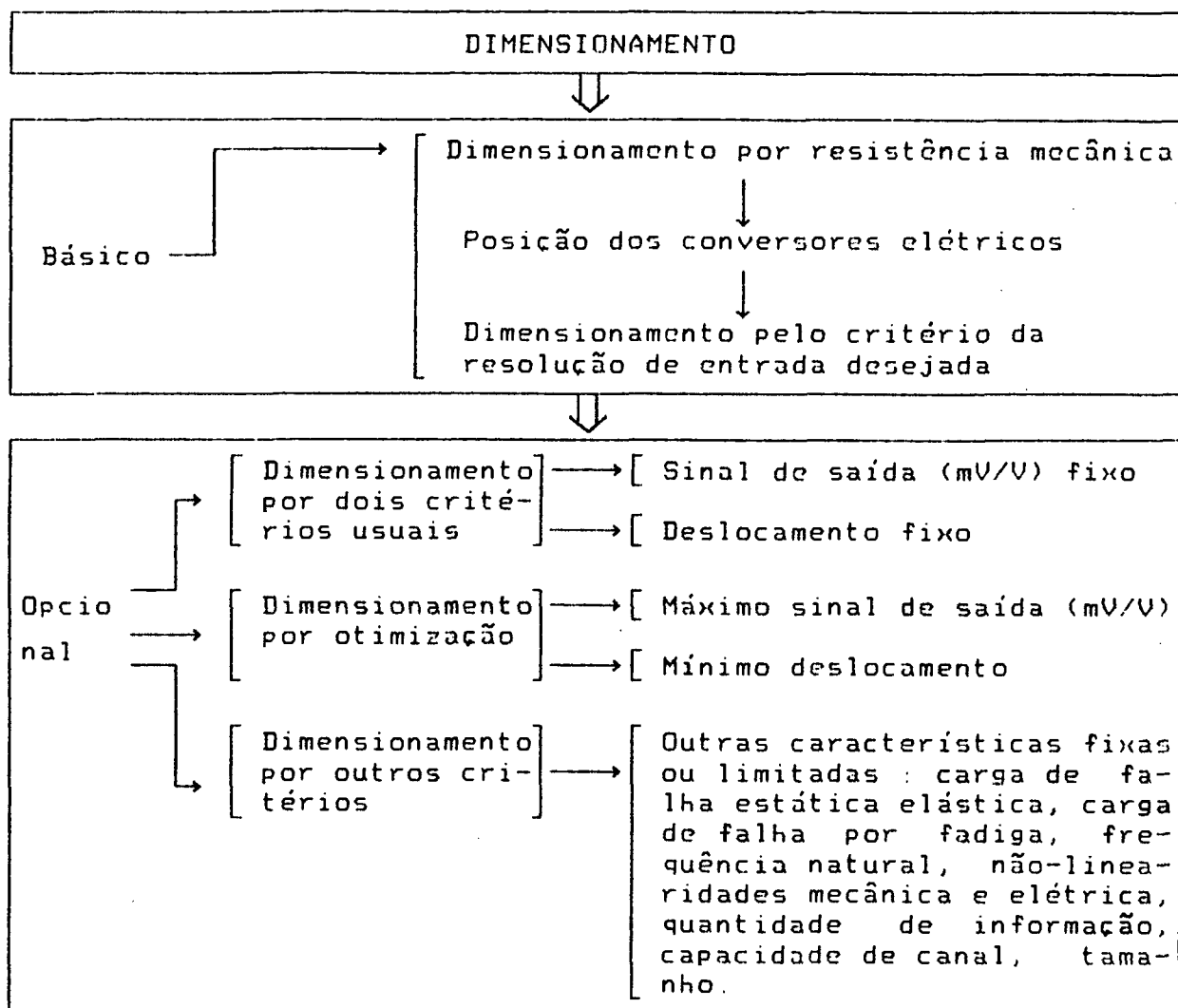


Fig. 5.4 - Ilustração do procedimento de dimensionamento do elemento elástico.

por outros critérios, indicada na figura 5.4. Assim, o procedimento adotado permite obter projetos otimizados de modo interativo.

A otimização, indicada nas figuras 5.3 e 5.4, é realizada utilizando um algoritmo elementar, baseado nas figuras 5.5 e 5.6, onde o sinal de saída relativo ou o deslocamento são função de uma única dimensão do elemento elástico, a mesma calculada por resistência mecânica e recalculada pelo critério da resolução de entrada desejada.

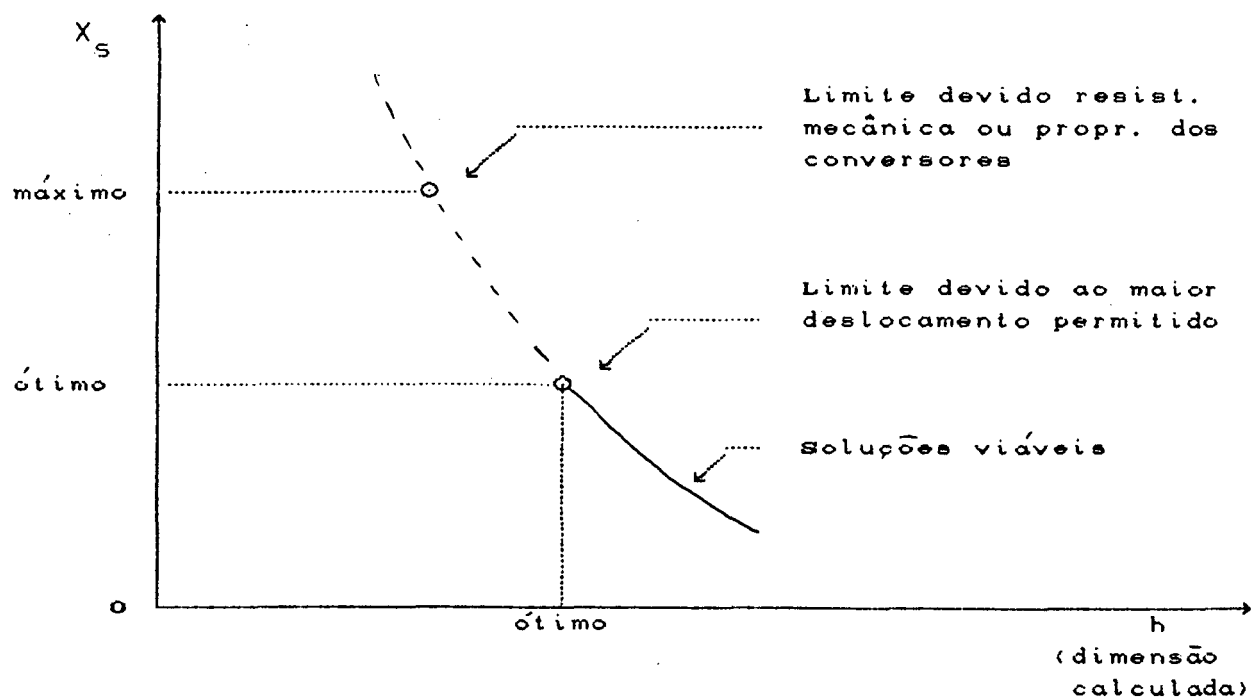


Fig. 5.5 - Sinal de saída X_s em função da dimensão calculada.

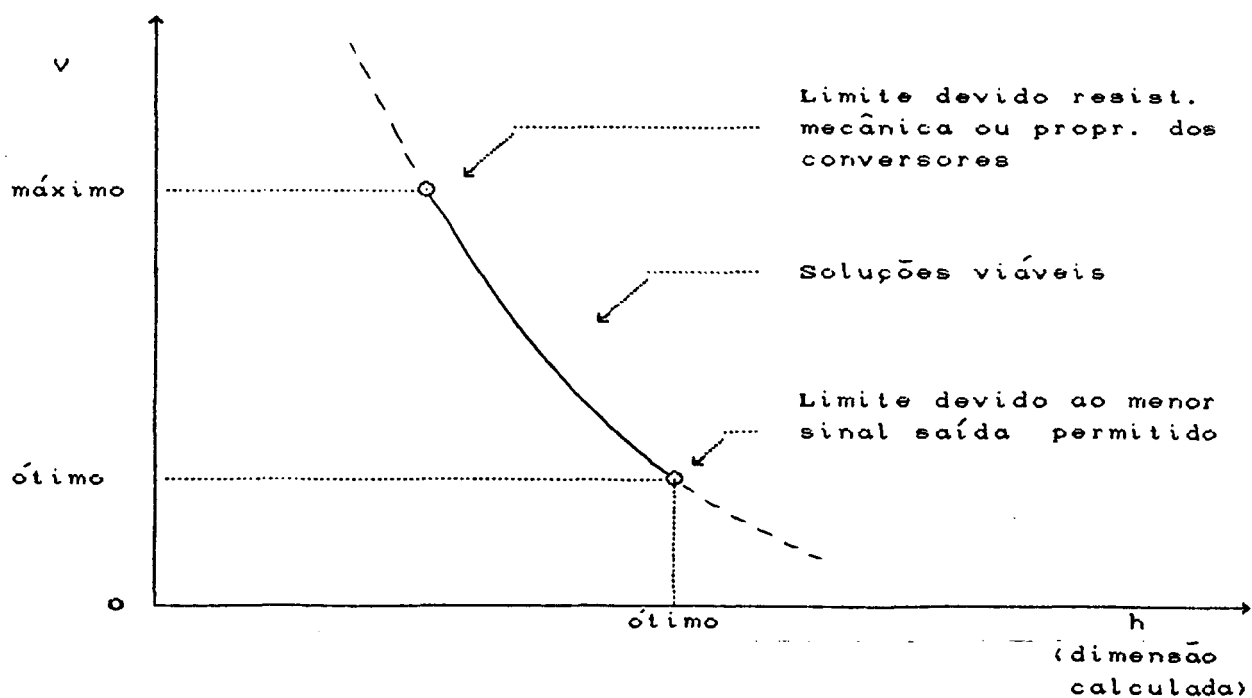


Fig. 5.6 - Deslocamento v em função da dimensão calculada.

5.3 EXEMPLO DE PROJETO COM O PROGRAMA IMPLEMENTADO

No exemplo que segue, são mostradas todas etapas relacionadas com Avaliação da Necessidade do Projeto, Projeto Preliminar e Saída dos Resultados.

O problema consiste em projetar um transdutor de força com as seguintes características:

- Carga estática compressiva uniaxial até 1000 N;
- Uso geral (aplicação em ensaios de laboratórios e montagens diversas que exigem medição de forças), com proteção às sobrecargas acidentais, à umidade e aos efeitos térmicos;
- Tamanho compacto e pouca altura;
- Resolução ≤ 1 N;
- Erro combinado (histerese + não-linearidade + não-repetibilidade) $\leq 0.3\%$.

Os sistemas de proteção exigidos para o problema requerem soluções que dependem muito da experiência e conhecimentos do projetista. Nos transdutores de força de mercado são frequentemente usados batentes para prevenir sobrecargas; botões de carga, rótulas e diafragmas para diminuir o efeito de componentes indesejáveis; tubos ou caixas vedadas com solda contra poeira, umidade, fogo.

O projeto de tais elementos estruturais poderia ser realizado em conjunto com os elementos elásticos de transdutores de força, e constitui uma possibilidade de ampliação do PEETE.

Os recursos referentes a sistemas de proteção, incluídos no PEETE, são indicações do que existe nos transdutores de mercado e apresentam-se no anexo A. Eles são mostrados na avaliação da necessidade do projeto.

Essa avaliação procede numa sequência de 3 menus, conforme a

indicação de setas na figura 5.7.

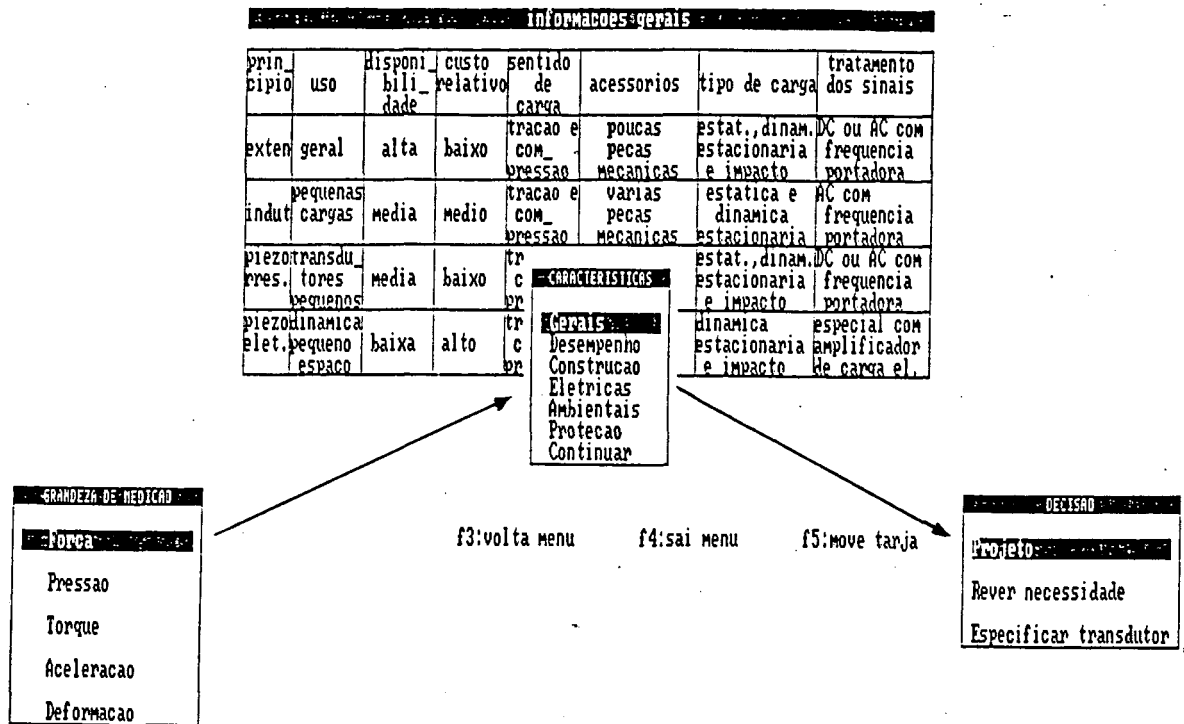


Fig 5.7 - Procedimento de avaliação da necessidade do projeto.

Com o primeiro menu, escolhe-se uma das 5 grandezas de medição (força).

O segundo menu serve para escolher qualquer uma das 6 tabelas de características, oferecidas para cada grandeza de medição, na ordem que o usuário desejar. Na figura 5.7, consta a tabela de informações gerais de transdutores de força. A exibição das 6 tabelas de transdutores de força é prosseguida, enquanto não for acionada a opção de menu "continuar". As 30 tabelas que podem ser oferecidas, para todos transdutores, são apresentadas no anexo A.

Após analisar as características indicadas nas tabelas e compará-las com as exigências do projeto, deve-se decidir, através do terceiro menu, qual a solução adotada. Se a decisão recair em especificar um transdutor de mercado, o programa oferece uma lista

de características, preenchidas conforme indicado na figura 5.8. Se a decisão for projetar e construir, então o PEETE auxilia, proporcionando um projeto preliminar.

ESPECIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR DE FORÇA

1 Designação	-	XXX
2 Fabricante	-	XXX
3 Tipo de força (tração, compressão, ...)	-	compressão
4 Tipo de carga (estática, dinâmica, ...)	-	estática
5 Faixa de medição	N	0 a 1000
6 Resolução	N	< 1
7 Histerese	%UF	--
8 Não-linearidade	%UF	--
9 Não-repetibilidade	%UF	--
10 Erro combinado (hist+não-lin+não-rep)	%UF	< 0.3
11 Tamanho	mmXmmXmm	30 x 12
12 Deslocamento p/UF (valor final f. medição)	mm	< 0.1
13 Frequência natural	Hz	> 4000
14 Resposta em frequência	Hz	--
15 Sinal saída	mV/V	2
16 Faixa temperatura de operação	°C	5 a 50
17 Influência temperatura no zero	%UF/°C	0.01
18 Influência temperatura na sensibilidade	%/°C	0.01
19 Proteção ambiental	-	blindado
20 Outros (rise time, ...)	-	--

Fig. 5.8 - Características especificadas para um transdutor de mercado.

O projeto preliminar inicia com a escolha simultânea da forma do elemento elástico e do princípio de conversão elétrica (figura 5.3). Para isso são usadas, por ora, informações que relacionam formas e princípios de transdutores existentes (anexo A). A tabela da figura 5.9 resume tais informações, em termos das formas básicas e dos princípios considerados.

Observando a tabela, percebe-se que, com exceção de colunas (usadas para cargas maiores), as outras formas básicas podem ser empregadas para a carga máxima de 1000 N exigida. As incertezas de

medição de todas formas abrangem o similar erro combinado. Mas o menor tamanho, e com pouca altura, é das placas, usando conversores extensométricos. Assim, escolhe-se o elemento básico placa.


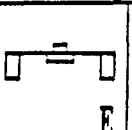
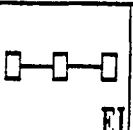
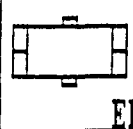
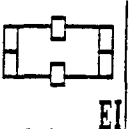
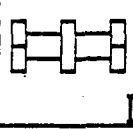
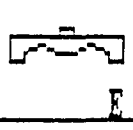
A forma particular é selecionada na figura 5.10, onde grupos de variações de placas circulares semelhantes estão dispostos num menu tipo reticulado matricial, ocupando as linhas da matriz. As duas últimas colunas da matriz indicam as cargas nominais recomendadas para os grupos, usando princípios extensométricos (letra E) ou indutivos (letra I). Foram selecionados o primeiro elemento da matriz e o princípio de conversão extensométrico. Observa-se que a escolha do princípio indutivo seria perfeitamente admitida no programa.

ELEMENTOS ELASTICOS BASICOS E CARACTERISTICAS GERAIS DE TRANSDUTORES DE FORÇA

Forma básica	Conv. Elet	Valor f. de carga UF	Sensib. Transd. (U/N)	Incert. de Med. (%UF)	Não-linearidade (%UF)	Massa (kg)	Desloc. Nominal (mm)	Frequen. Natural (kHz)	Tamanho base X altura (mm X mm X mm)
Viga	Ext.	5mN	18n	.02--1 (.2)	.016--1 (.1)	.05-- 60	1 ^{mm} --2 (.4)	.2-- 10	D17x117 -- D301x203
		2mN	10						
	Ind.	.1mN	7m	.2--3.5 (1)	—	.05-- 13	--1 (1)	.01-- .68	33x12x19-- 102x19x32
Placa	Ext.	5mN	24n	.09--1.3 (.5)	.025--1 (.4)	.006-- 45	.06--1 (.08)	.4-- 19	D12x4 -- D210x430
		1mN	3m						
	Ind.	10mN	4u	.2--1 (.7)	.2--1 (.7)	.2-- 10	.1--1 (.4)	.06-- 4.5	90x32x60-- D160x180
Coluna	Ext.	1kN	.1n	.03--2.3 (.5)	.01--1 (.3)	.007-- 227	8 ^{mm} --1.2 (.25)	1-- 50	D13x102 -- D762x1270
		20mN	7.2u						
	Ind.	50kN	2u	—	—	-- 4	—	—	-- D76x298
Anel	Ext.	50 N	.2u	.03--.5 (.3)	.016--.4 (.2)	.07-- 5	.08--.4 (.15)	.2-- 3.8	D32x64 -- D110x126
		50kN	720u						
	Ind.	5 N	—	--1	--1	—	—	—	D40x60 -- 75x230x275

Obs: 1) dados obtidos de catálogos; 2) entre () estão valores médios.
ESCOLHER FORMA BÁSICA

Fig. 5.9 - Escolha do elemento elástico básico.

ELEMENTOS ELÁSTICOS TIPO PLACA PARA TRANSDUTORES DE FORÇA						Carga Nominal	
						E	I
						5 N 1 MN	10 mN 500 kN
						5 N 500 kN	200 N 100 kN
						—	50 mN 200 N
						50 N 500 kN	—

Conversor elétrico? ☐ Sim ☐ Não I Outro

Fig. 5.10 - Escolha do elemento elástico e do princípio de conversão elétrica.

O programa prossegue com a escolha do material do elemento elástico, empregando a tabela da figura 5.11. Nela constam números de valoração das características do material, sendo desejável valores próximos de 10. Devido aos números altos referentes a custo, linearidade, histerese, relaxação e consistência com lote, e pela indicação de excelente para uso em transdutores, escolheu-se o aço AISI 4340. Em seguida, são mostradas as especificações desse material escolhido (figura 5.12). Se não houver condições de obter, com tratamento térmico, o limite de escoamento e dureza indicados, então retorna-se à tabela na figura 5.11, escolhe-se "outros" e assim as especificações da figura 5.12 passam a ser fornecidas pelo usuário.

GUIA PARA SELECAO DO MATERIAL DE ELEMENTOS ELASTICOS(peso 0-10,desejavel=10)

Designacao do material	Tmax (°C)	Condutiv. term. de	Linea de resse	Histe	Creep /relaxacao	Custo	Usina	Distores	resis. sold	deq. cons	phs. (uso em transdutores)
4140	204	3	8	8	7	9	5	3	1	5	6 MB-mulhom
2840	260	3	8	8	8	8	5	3	1	5	8 Excelente
18Ni(250)marag.	316	2	8	8	7	4	5	8	2	8	5 B-usoraro
410 inox	204	2	7	7	6	7	4	2	6	2	6 uso raro
631(17-7PH)inox	204	2	8	8	7	6	6	8	7	7	5 uso largo
632(PH15-7Mo)in	260	2	8	8	8	4	6	8	7	7	5 E-usoraro
AISI 304 inox	121	2	5	4	4	7	3	-	8	5	6 F-fraco
Liga Ni-Span-C	121	1	8	8	8	3	3	4	3	5	7 MB-carro
2014-T6 Al	93	8	6	7	6	5	8	9	3	3	6 B-bom
2024-T6/T351 Al	93	7	6	7	6	5	8	9	3	3	6 B-u.largo
2024-T31 Al	121	8	7	8	7	5	8	9	3	3	6 melhor Al
6061-T6 Al	66	8	5	4	4	6	7	8	4	5	5 regular
7075-T6 Al	38	7	7	6	6	5	8	8	3	2	5 F-T.elev.
Cobre-beril. 25	121	7	8	8	8	2	5	9	3	4	7 Excl-carro
6Al4V titanium	149	1	7	7	7	2	3	2	8	4	5 ApicEspec
Cer.Al2O3(99+%)	260	3	7	8	8	1-3	1	-	10	-	7 ApicEspec
Lam.glass-epoxy	66	0	5	4	3	5	3	-	4	-	3 erro alto
Outros	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Epsilonics, august, 1983.

Se nao existir o material em estoque, escolha OUTROS.

Esc : executa

Fig. 5.11 - Escolha do material do elemento elástico.

ESPECIFICACAO DO MATERIAL

Designacao : 4340
 Modulo de elasticidade, E (GPa): 207.0
 Modulo de elast. cisalh., G (GPa): 79.6
 Coeficiente de Poisson : 0.30
 Limite de escoamento (MPa): 1449
 Lim. de fadiga(>E+6 ciclos) (MPa): 600
 Coef. expansao termica (ppm/°C): 11.3
 Massa especifica (g/cm3): 7.84
 Dureza (em Rc ou outra) : 43-46
 Confirma material escolhido? ☒ N Esc : executa

Fig. 5.12 - Especificação do material escolhido.

A seguir , realiza-se a especificação dos conversores elétricos. A figura 5.13 mostra a ordem de seleção e as duas

CONVERSORES EXTENSOMETRICOS

Ordem de selecao(consultar catalogos):

4	4	6	2	3	1	5
Material da matriz base	Liga do extensometro	Dilatacao termica (compens.)	Comprim. ativo do extensom.	Geometria da grade e terminais	Resistencia do extensom.	Opcoes disponiveis

Ex. de especificacao: ~~IN-127-3 MM Pd=6~~

		DENSIDADE DE DISSIPACAO TERMICA Pd(mW/mm ²)				
PRECISAO REQUERIDA		EXCELENTE	BOA	MEDIA	POBRE	MUITO POBRE
		pecas macicas de Al ou Cu	pecas macicas de aço	inox ou tita nio delgados	plastic:fibre glass, epoxy	plast:acrilico, polystyrene
Estatica	alta	3.1 a 7.8	1.6 a 3.1	.78 a 1.6	.16 a 3.1	.016 a .031
	media	7.8 a 16	3.1 a 7.8	1.6 a 3.1	.31 a .78	.031 a .078
	baixa	16 a 31	7.8 a 16	3.1 a 7.8	.78 a 1.6	.078 a .160
Dinamica	alta	7.8 a 16	7.8 a 16	3.1 a 7.8	.78 a 1.6	.016 a .078
	media	16 a 31	16 a 31	7.8 a 16	1.6 a 3.1	.078 a .31
	baixa	31 a 78	31 a 78	16 a 31	3.1 a 7.8	.31 a .78

*** Fonte: IN-127-3 MM Tech Note ***

Estabelecer a densidade de potencia dissipada, pd= 6

Fig. 5.14 - Estabelecimento da densidade de potência térmica a ser dissipada.

O dimensionamento do elemento elástico escolhido é baseado de início no critério da resistência mecânica. Como se observa na figura 5.16, os raios a,b, indicados no esboço do elemento, são escolhidos levando em conta os limites dimensionais impostos pelos extensômetros e pela própria formulação. As cargas indicadas são W_{vf} (carga correspondente ao valor final da faixa de medição) e W (W_{vf} +sobrecarga). N representa a segurança inicial para o critério da resistência. A dimensão calculada é a espessura h.

Após isso, é possível posicionar os extensômetros sobre a superfície plana interna do elemento elástico. Os quatro extensômetros são arranjados simetricamente e suas posições denotadas pelas variáveis x, y, referenciadas à borda do elemento

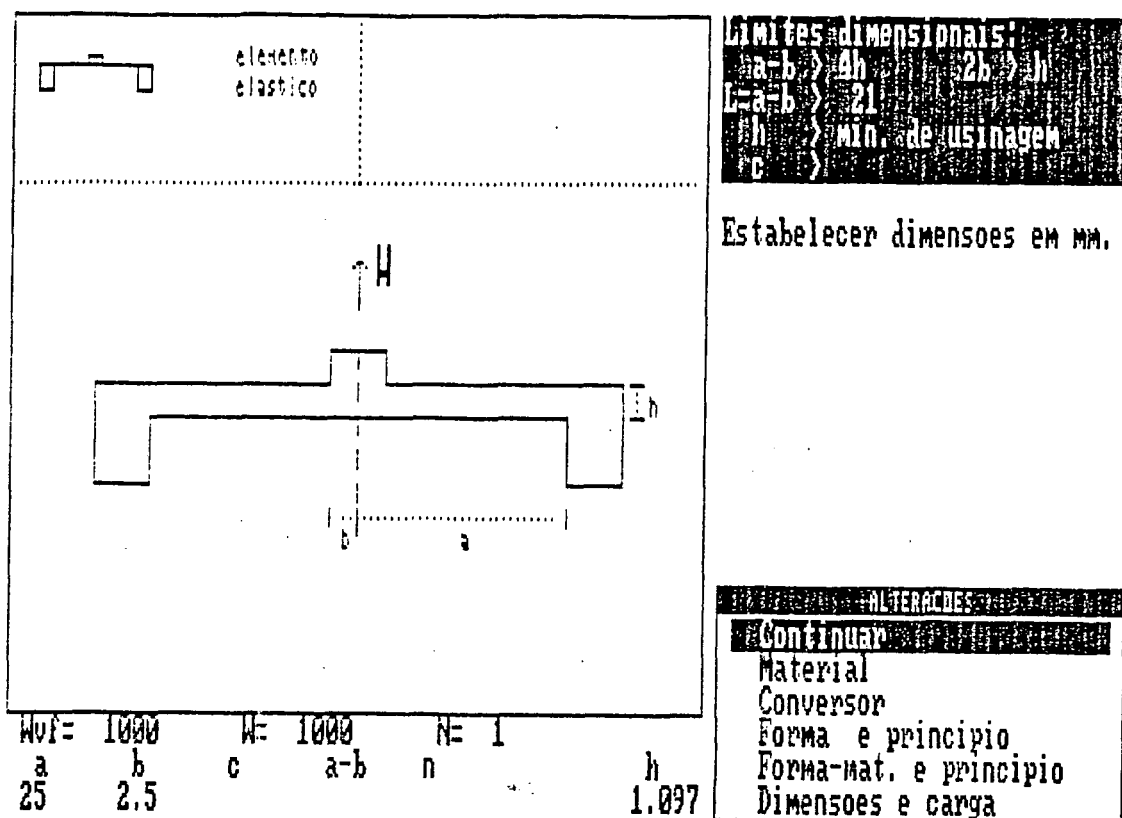


Fig. 5.16 - Dimensionamento do elemento elástico por resistência mecânica.

também o cursor, sobrepondo-se à curva anterior. Obteve-se $x = 16.7$ mm (posição radial $r = 19.2$ mm) e $y = 6.3$ mm (posição radial $r = 8.5$ mm), como indicado na figura 5.18.

O passo que segue é o cálculo da resolução mínima, que é o maior valor entre aqueles obtidos por resistência mecânica e pelo limite de deformação máxima adotada para cada extensômetro (1200 $\mu\text{m/m}$). Obteve-se uma resolução mínima de 0.23 N e adotou-se 0.25 N. Com esta procedeu-se a repetição do cálculo da espessura h , baseado no critério da resolução desejada. Os valores obtidos de h e das características calculadas estão indicados na figura 5.18.

Entre as características calculadas, e que representam um primeiro resultado de projeto, a não-linearidade ultrapassa o

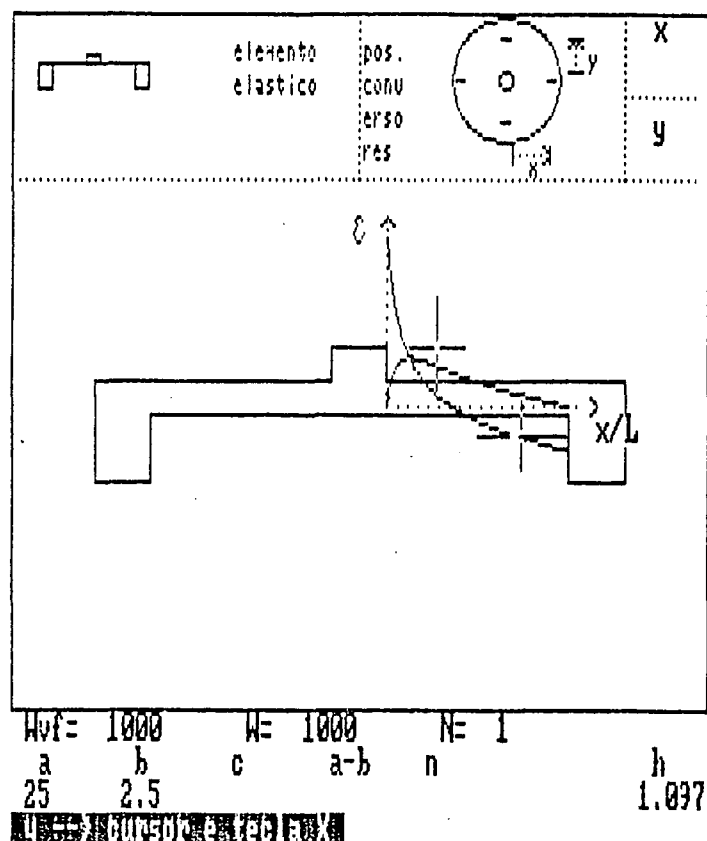


Fig. 5.17 - Posicionamento dos extensômetros sobre a superfície plana interna do elemento elástico.

próprio erro combinado de 0.3%, inicialmente exigido. Então, o projeto é refeito, seguindo as opções do menu da figura 5.18, cujas derivações são esquematizadas na figura 5.19. Nas derivações onde a espessura h é recalculada por um dos critérios escolhidos, sempre segue o cálculo e apresentação das características, com o conseqüente retorno do menu das opções.

Para diminuir a não-linearidade, inicialmente redimensionou-se o elemento elástico, mudando os raios a, b sem obter sucesso e, do mesmo modo, a mudança da posição dos conversores pouco contribuiu

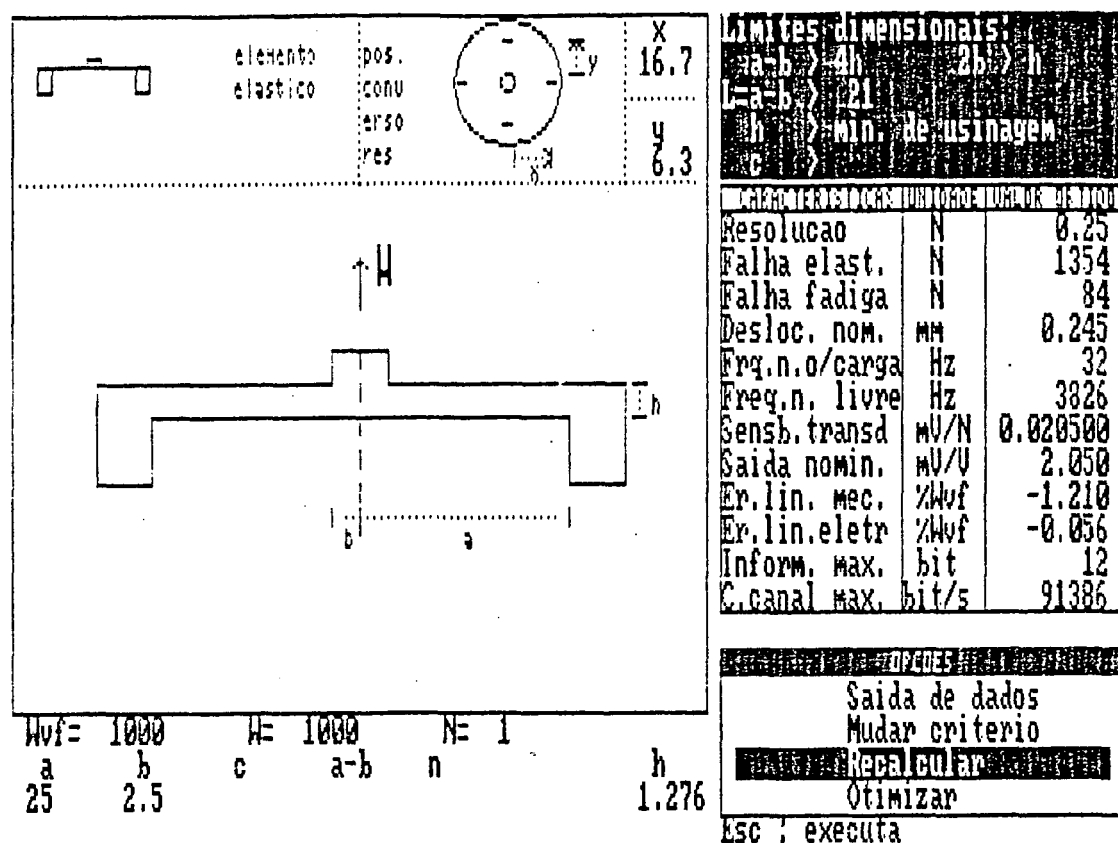


Fig. 5.18 - Dimensões e características obtidas após dimensionamento por resolução.

para diminuir tal erro. A utilização do critério de sinal de saída fixo em 2 mV/V também não logrou êxito.

O resultado satisfatório, com não-linearidade calculada de 0.2%, foi obtido ao empregar o critério da otimização elementar de deslocamento mínimo. Mas o sinal de saída relativo caiu para 1.224 mV/V, quando normalmente são usados valores próximos de 2mV/V. Então, com a finalidade de aumentar seu valor, foram utilizados extensômetros de menor tamanho e maior resistência elétrica. Esses proporcionaram os resultados mostrados nas três saídas do programa,

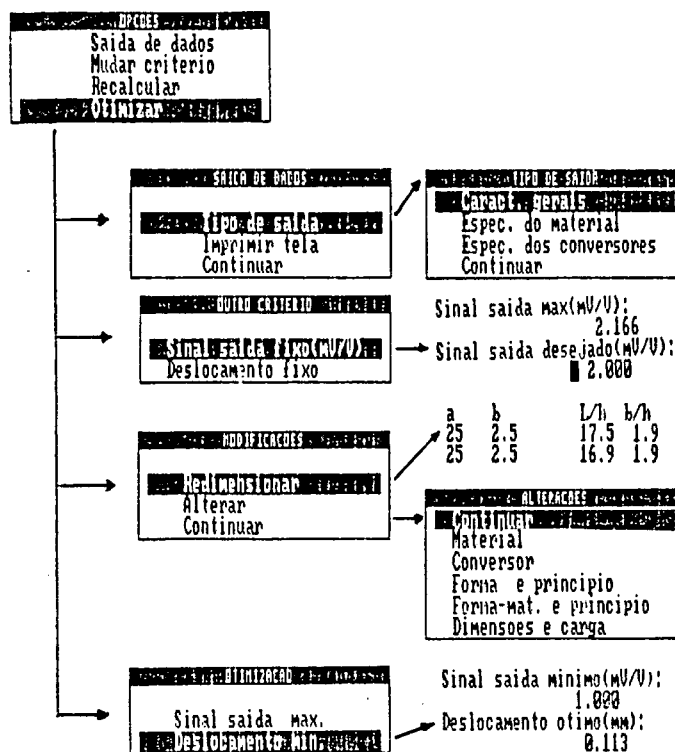


Fig. 5.19 - Derivações de opções após cálculo das características.

indicadas nas figuras 5.20, 5.21 e 5.22, que também atendem às exigências de projeto, agora com sinal de saída relativo de 1.8 mV/V.

O projeto preliminar completo, com as características necessárias para a solução do problema proposto, foi obtido em 45 minutos de operação do PEETE, que é um tempo bem menor do que o da solução manual (8 horas, aproximadamente).

Os resultados que o PEETE fornece são, em resumo:

- Desenho esquemático da forma do elemento elástico, com um número necessário de dimensões que a identifiquem;
- Especificação do material do elemento elástico;
- Esboços indicativos da posição dos conversores elétricos;
- Especificação dos conversores elétricos (extensométricos, indutivos e outros que possam ser especificados com o mesmo tipo de características);

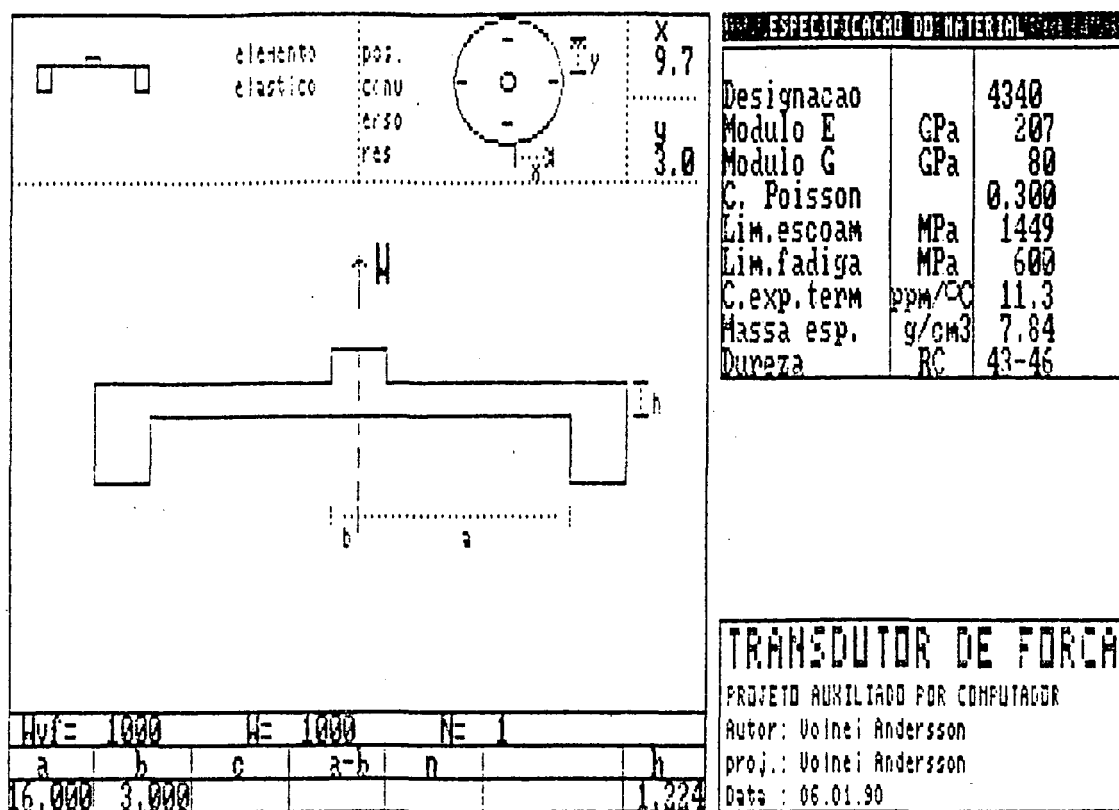


Fig. 5.20 - Forma, dimensões e material do elemento elástico escolhido.

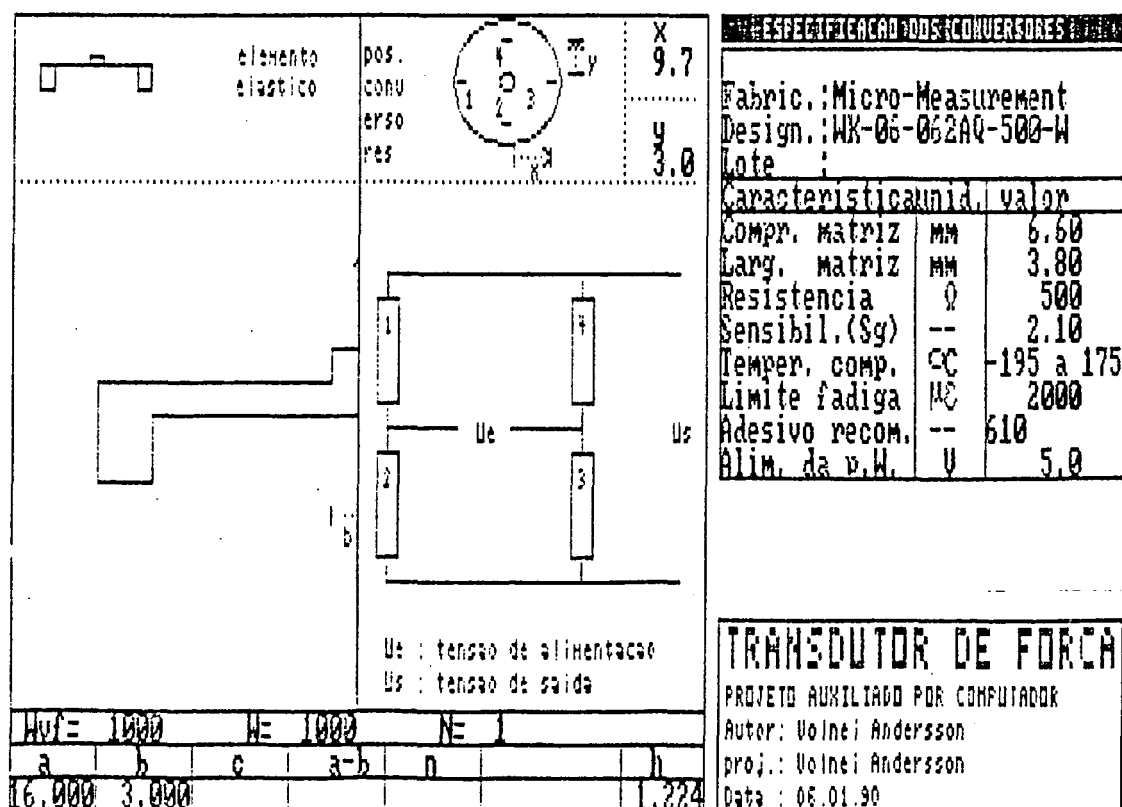


Fig. 5.21 - Especificação e posição dos conversores elétricos escolhidos.

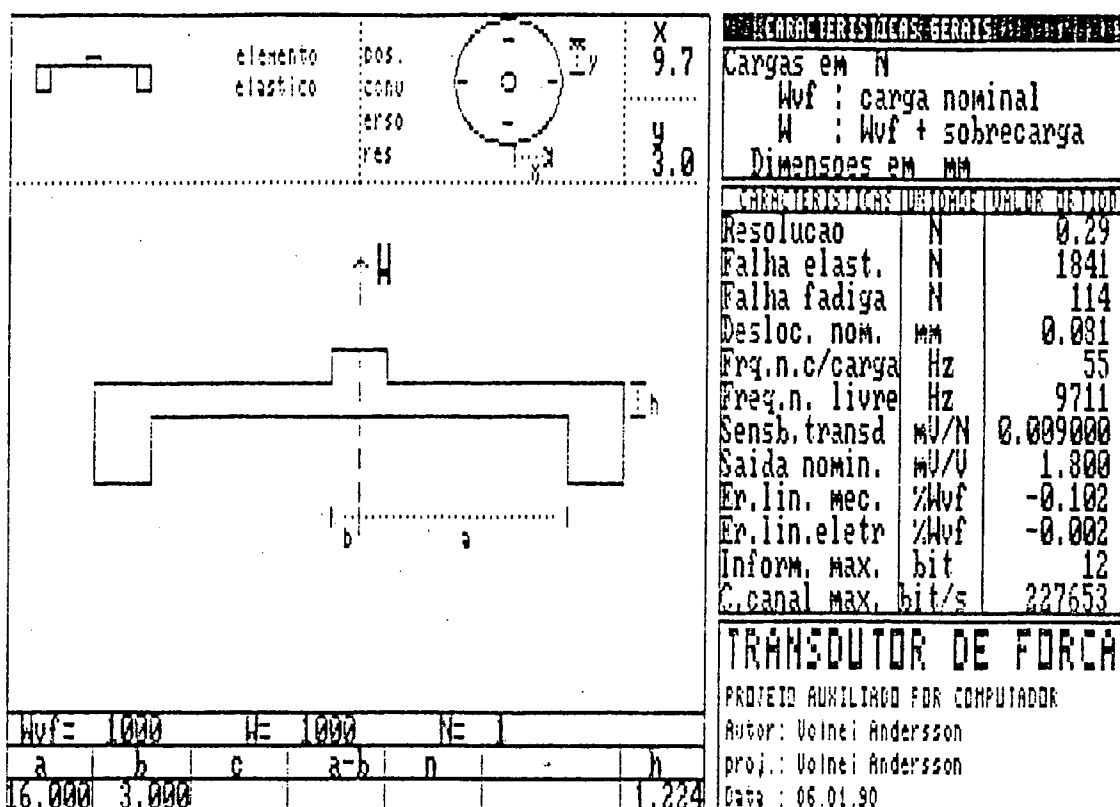


Fig. 5.22 - Características determinadas para o transdutor de força.

- Características do transdutor, sem considerar influência das condições ambientais.

5.4 AS INOVAÇÕES INTRODUZIDAS

Esta tese produziu as seguintes inovações, no campo do projeto de transdutores eletro-mecânicos:

1) Uma sistemática especializada para o projeto de elementos elásticos, que reúne experiência acumulada, teoria e técnicas em quatro ramos do conhecimento de engenharia: metrologia, mecânica dos sólidos, metodologia de projeto e projeto auxiliado por computador.

2) Um sistema computacional, implementado como exemplo da

sistemática, para auxiliar o projeto de elementos elásticos de transdutores de força, constituindo-se numa nova ferramenta que, com as características consideradas, proporciona uma variedade de soluções rápidas e otimizadas, em problemas típicos e específicos de medição de força.

Ao aplicar o sistema implementado, programa PEETE, na solução de um problema de exemplo proposto, puderam ser destacados recursos tais como:

- Menus para a seleção das formas de elementos elásticos;
- A orientação para a especificação dos conversores elétricos;
- A possibilidade de se usar outros conversores de deformação específica ou de deslocamento;
- Possibilidade de prever sobrecargas;
- O modo interativo de posicionar os conversores extensométricos;
- O tempo relativamente rápido de obter a solução.

Além disso, o programa PEETE também pode ser empregado para analisar transdutores existentes, como efetuado na validação de sua formulação, ao examinar protótipos de transdutores disponíveis.

6. VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA APROXIMADA DESENVOLVIDA

A formulação analítica aproximada, desenvolvida para elementos elásticos de transdutores de força, é fundamental no programa implementado. As expressões deduzidas e utilizadas no cálculo das características e nos dimensionamentos, segundo os critérios estabelecidos, sofreram um extenso processo de depuração, comparando seus resultados com soluções analíticas conhecidas ou obtidas manualmente. Porém ainda houve necessidade de validá-las experimentalmente.

A validação experimental para as 36 formas de elementos elásticos, incluídas no programa, onde cada uma pode constituir uma família de elementos de diferentes tamanhos, associados a cada um dos dois princípios de conversão, extensométrico ou indutivo, é impraticável.

Nesta tese, a validação é realizada parcialmente, utilizando resultados experimentais e também o método dos elementos finitos, observando as características: tensão máxima, deslocamento máximo, frequência natural, não-linearidade, deformação específica, e sensibilidades de deformação específica e de deslocamento. A deformação específica e as sensibilidades foram observadas indiretamente, através do sinal de saída relativo.

Para isso foram analisados 9 protótipos de transdutores de força extensométricos (quatro placas circulares, quatro colunas e um anel quadrado) e aproveitados resultados colhidos na bibliografia, como descrito nos itens que seguem.

6.1 VALIDAÇÃO COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Na bibliografia consultada, foi encontrado um número relativamente grande de trabalhos discorrendo sobre o emprego do método dos elementos finitos, no projeto de transdutores com elemento elástico. Mas, com exceção de um artigo sobre projeto de anéis dinamométricos [20], nos demais não se indicam as dimensões dos elementos elásticos, necessárias para usar o PEETE. Em quase todos, a preocupação maior foi descrever o modelo ou o pacote de elementos finitos usado e, naturalmente, os resultados obtidos.

Para analisar os protótipos de placas e anel quadrado, utilizou-se um pacote de elementos finitos de mercado [14]. Os protótipos de placa foram modelados com elementos isoparamétricos axissimétricos lineares e o anel quadrado com elementos isoparamétricos para estado plano de tensões. Como tal pacote é baseado no método dos deslocamentos, as malhas foram refinadas até a convergência dos resultados de deslocamento e até que as tensões normais médias nos nós das superfícies atingissem valores da ordem de 0.1 N/mm^2 .

A versão usada fornece apenas deslocamentos e tensões e, por isso, as deformações foram calculadas manualmente com as relações tensões-deformações da Elasticidade. Com as deformações, determina-se o sinal de saída para as comparações necessárias.

6.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Na validação experimental, para 2 protótipos com elemento elástico tipo placa circular, o sinal de saída relativo era a única característica experimental conhecida, e obtida de testes

anteriores ao período de desenvolvimento da tese. Os resultados experimentais dos 7 protótipos disponíveis foram obtidos com aquisição automatizada de dados, empregando o microcomputador e o sistema de aquisição de dados marca Hewlett Packard - Hp, e um *software* especialmente desenvolvido.

O projeto mecânico da maioria dos protótipos disponíveis eis testados não se desenvolveu em estrutura monobloco, como é o caso de um dos elementos elásticos tipo placa circular e os tipo coluna, que têm dispositivos de aplicação de carga montados sobre o elemento elástico. Esses dispositivos são rótulas roscadas (colunas) e botão de carga roscado (placa). A carga é transmitida parcialmente através das partes roscadas.

Essas soluções construtivas associam atrito e rigidez de contato puntual e superficial, podendo ocorrer pequenos movimentos relativos e acomodação das partes. Assim, o comportamento experimental deslocamento *versus* carga desses protótipos é não-linear, principalmente no início do carregamento, e o valor medido do deslocamento, para a carga máxima, é superior ao que se obteria somente para o elemento elástico.

Além dos inconvenientes atrito e rigidez de contato, a medição do deslocamento desses protótipos foi dificultada por não se poder cumprir o princípio de ABBE (impossível o acesso ao correto ponto de medição) e pela inexistência de medidores adequados.

A medição dos deslocamentos, livre dos fatores influentes, é essencial para a comparação com a formulação analítica e, até mesmo, com o método dos elementos finitos.

Os deslocamentos medidos e outras características obtidas experimentalmente (calibração estática), para a validação da formulação do PEETE, são comentados no item 6.3 que segue.

6.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE ELEMENTOS FINITOS COM OS DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA

6.3.1 Elementos elásticos tipo viga

Elementos elásticos tipo viga uniforme têm sua formulação bem conhecida e testada. Porém os de dimensões fora dos limites de validade da formulação e os de secção transversal variável necessitam ser testados. Protótipos destes elementos não estavam disponíveis e os descritos na bibliografia apresentavam informações insuficientes para comparar com a formulação deduzida do programa PEETE.

Em [84], são mostradas as distribuições das deformações específicas de elementos elásticos tipo viga, com forma de S, obtidas através do método dos elementos finitos. As distribuições de deformações comparáveis têm a mesma forma das distribuições obtidas para os elementos S, com furo circular, empregados no PEETE (figura 6.1).

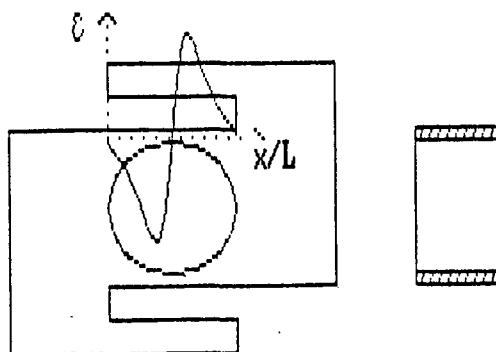


Fig. 6.1 - Distribuição de deformações específicas nas faces planas de elementos elásticos tipo S, obtida no PEETE.

6.3.2 Elementos elásticos tipo placa circular

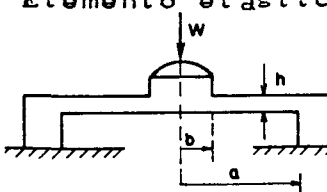
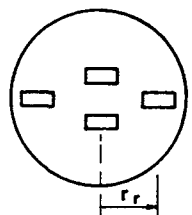
Os quatro elementos tipo placa circular analisados estão esquematizados nas figuras 6.2 até 6.5. Eles têm uma forma de copo, sendo que o último apresenta um furo central passante, com rosca interna.

Para o elemento da figura 6.2, o único valor experimental disponível é o do sinal de saída relativo. A comparação deste com o obtido analiticamente no PEETE, mostra uma diferença de 5.8%. As outras características analíticas da figura 6.2 são comparadas com resultados de elementos finitos, tendo diferenças de mesma ordem.

Para o elemento da figura 6.3, estão disponíveis valores experimentais adicionais e a comparação, como no caso anterior, indica a mesma ordem de diferenças do sinal de saída relativo.

Nas figuras 6.4 e 6.5, a aproximação de elementos finitos é aceitável em relação aos valores experimentais. Mas os resultados analíticos, obtidos com o PEETE, estão relativamente afastados dos experimentais (35% e 31%, respectivamente, no sinal de saída). As razões principais destas diferenças são a influência do tamanho relativo e forma do ressalto central, suposto igualmente rígido nas deduções analíticas dos 4 elementos tipo copo, e a influência da espessura relativa h/a . Esse fatores são discutidos com base em erros de avaliação, como segue.

Tomando como referência os valores experimentais do sinal de saída, determinaram-se os erros de avaliação dos seus valores analíticos e dos valores de elementos finitos, indicados na figura 6.6, onde se procura mostrar a influência das relações h/a , b/a sobre tais erros. Percebe-se que os erros analíticos, nos elementos não vazados, crescem proporcionalmente às relações h/a e

<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 580 \text{ N}$ $a = 20 \text{ mm}$ $b = 4 \text{ mm}$ $h = 1.05 \text{ mm}$ </p> <p>Material : AISI 4340</p>		<p>Conv. elétricos : AP232-NC-6 (SODMEX, 350 Ω)</p>  <p> $r_r = 15 \text{ mm}$ $r_t = 10 \text{ mm}$ </p>		
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	E. FINITOS	EXPERIM.
Tensão máxima para W	N/mm ²	599.8	569.3 ^(*)	—
Deslocamento max. p/W	mm	0.113	0.126 ^(*)	—
Sinal saída para W	mV/V	1.14	1.12 ^(*)	1.21
Não-linearidade mec.	%VF	-0.25	—	—
Não-linearidade elétr.	%VF	-0.01	—	—
Não-lin.mec. + elétrica	%VF	-0.26	—	—
Freq. natural c/carga	Hz	47	44 ^(*)	—
Freq. natural livre	kHz	5.41	4.61 ^(*)	—

(*) : formulação corrigida [10].

Fig. 6.2 - Comparação dos resultados para transdutor de força tipo copo.

$h/(a-b)$, enquanto o mesmo não ocorre para a relação b/a . Além disso, observa-se que o limite até onde vale a formulação analítica dos elementos não vazados está em torno de $h/(a-b)=0.20$ [77] (esta relação é 0.25 para o protótipo da figura 6.4). Por interpolação dos erros analíticos da figura 6.6, determina-se que, quando $h/(a-b) < 0.15$, consegue-se $|E_{\text{analítico}}| < 10\%$, para o sinal de saída, em elementos não vazados.

Procedendo do mesmo modo, quanto ao deslocamento máximo, os erros de avaliação analíticos, nos protótipos das figuras 6.3 (elemento não vazado) e 6.5 (elemento vazado), são superiores a 10%, em relação aos valores experimentais (figura 6.6). Ao examinar os mesmos protótipos com elementos finitos, tais erros caíram a

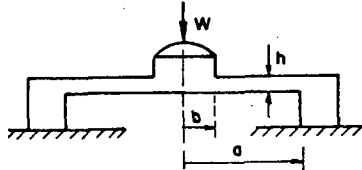
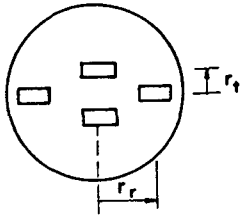
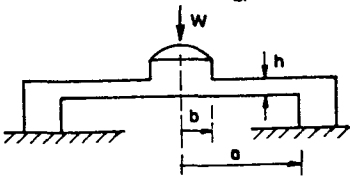
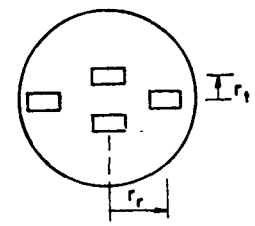
<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 1766 \text{ N}$ $a = 20 \text{ mm}$ $b = 2.5 \text{ mm}$ $h = 1.54 \text{ mm}$ </p> <p>Material : VC-131-52 OU D6(828)</p>		<p>Conv. elétricos : EA 36-125AD-120 (Micro Meas.)</p>  <p> $r_r = 15 \text{ mm}$ $r_t = 7 \text{ mm}$ </p>		
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	E. FINITOS	EXPERIM.
Tensão máxima para W	N/mm^2	1146	1100	—
Deslocamento max. p/W	mm	0.142	0.181	0.170
Sinal saída para W	mV/V	2.26	2.47	2.35
Não-linearidade mec.	%VF	-0.26	—	—
Não-linearidade elétr.	%VF	-0.06	—	—
Não-lin.mec. + elétrica	%VF	-0.32	—	-0.26
Freq. natural c/carga	Hz	42	37	38
Freq. natural livre	kHz	7.39	6.43	—

Fig. 6.3 - Comparação dos resultados para transdutor de força tipo copo.

valores inferiores a 10%. Então, tomando elementos finitos como referência, os erros de avaliação analíticos determinados são indicados na figura 6.7. Logo, pelos valores obtidos próximos daqueles da figura 6.6, elementos finitos podem substituir testes experimentais, quando os erros de avaliação analíticos forem superiores a 10%.

Na obtenção das características com o método dos elementos finitos, mencionou-se o uso de formulação analítica corrigida. Essa correção foi realizada para os elementos elásticos tipo copo de espessura uniforme e estrutura monobloco, baseando-se no método dos elementos finitos [10]. Ao aplicá-la ao elemento tipo copo, com furo central roscado e passante, observou-se que os erros de

<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 19620 \text{ N}$ $a = 90 \text{ mm}$ $b = 5.0 \text{ mm}$ $h = 6.2 \text{ mm}$ </p> <p>Material : AISI 4340</p>		<p>Conv. elétricos : desconhecidos ($S_g = 2$)</p>  <p> $r_r = 24 \text{ mm}$ $r_t = 7.5 \text{ mm}$ </p>		
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PIE EL	E. FINITOS	EXPERIM.
Tensão máxima para W	N/mm^2	654	707 ^(*)	—
Deslocamento max. p/W	mm	0.047	0.091 ^(*)	—
Sinal saída para W	mV/V	1.36	2.17 ^(*)	2.09
Não-linearidade mec.	%VF	-0.000	—	—
Não-linearidade elétr.	%VF	-0.003	—	—
Não-lin.mec.+ elétrica	%VF	-0.003	—	—
Freq. natural c/carga	Hz	73	52 ^(*)	—
Freq. natural livre	kHz	13.73	6.23 ^(*)	—

(*) : formulação corrigida [10].

Fig. 6.4 - Comparação dos resultados para transdutor de força tipo copo.

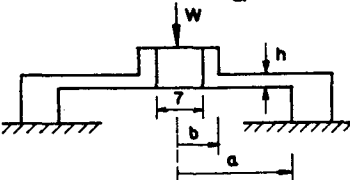
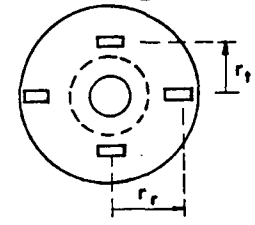
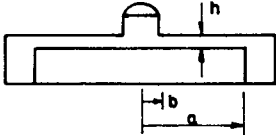
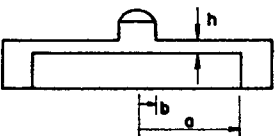
<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 9807 \text{ N}$ $a = 21 \text{ mm}$ $b = 7 \text{ mm}$ $h = 2.57 \text{ mm}$ </p> <p>Material : AISI 4340</p>		<p>Conv. elétricos : EA-06-125AD-120 (Micro Meas.)</p>  <p> $r_r = 16 \text{ mm}$ $r_t = 12 \text{ mm}$ </p>		
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	E. FINITOS	EXPERIM.
Tensão máxima para W	N/mm^2	1043	765	—
Deslocamento max. p/W	mm	0.075	0.137	0.148
Sinal saída para W	mV/V	1.98	2.71	2.86

Fig. 6.5 - Comparação dos resultados para transdutor de força tipo copo.

Característica	Relações adimensionais e erros E				
		fig. 6.2	fig. 6.3	fig. 6.4	fig. 6.5
	h/a	0.05	0.08	0.21	0.12
	$h/(a-b)$	0.07	0.09	0.25	0.18
Sinal saída	b/a	0.20	0.13	0.17	0.33
	$E_{analit.} \%$	-5.8	-3.8	-35	-31
	$E_{el.fin.} \%$	(*) -7.4	5.1	(*) 3.8	-5.2
	$E_{desloc. Máximo} \%$	—	-16	—	-49
	$E_{analit.} \%$	—	-16	—	-49
	$E_{el.fin.} \%$	—	6.5	—	-7.9

(*) : formulação corrigida [10].

Fig. 6.6 - Erros de avaliação da formulação analítica e de elementos finitos, em relação aos valores experimentais disponíveis do sinal de saída e do deslocamento máximo.

Relações adimensionais e erros E				
	fig. 6.2	fig. 6.3	fig. 6.4	fig. 6.5
h/a	0.05	0.08	0.21	0.12
$h/(a-b)$	0.07	0.09	0.25	0.18
b/a	0.20	0.13	0.17	0.33
$E_{an.s.s.} \%$	1.8 (*)	-8.5	-37 (*)	-27
$E_{an.des.} \%$	-10 (*)	-22	-48 (*)	-45

(*) : formulação corrigida [10].

Fig. 6.7 - Erros de avaliação dos valores analíticos do sinal de saída e do deslocamento máximo, em relação aos respectivos valores de elementos finitos.

avaliação estavam acima de 10%, em relação aos valores experimentais. Isso ocorreu porque o furo passante modificou a rigidez à flexão da placa, invalidando a aplicação da formulação analítica corrigida dos copos em estrutura monobloco.

Assim, considerando também os valores de tensão máxima, não-linearidade e frequência natural comparáveis, duas conclusões aparecem:

- 1 - A formulação analítica para elementos tipo copo em estrutura monobloco pode dar resultados com erros de avaliação menores do que 10%, desde que seja usada dentro dos seus limites de validade e, próximo ou fora deles, serve como uma primeira aproximação para projeto preliminar;
- 2 - A formulação analítica, corrigida com elementos finitos, tem validade restrita a cada família de elementos elásticos tipo placa circular de mesma forma.

Observa-se que, formulações analíticas corrigidas com elementos finitos, podem ser desenvolvidas para outras formas específicas, derivadas de vigas, colunas, anéis, etc..

6.3.3 Elementos elásticos tipo coluna

A formulação analítica para esses elementos é simples e confiável, principalmente na determinação das deformações específicas. Por isso dispensou-se o uso de elementos finitos e, como era esperado, o sinal de saída calculado está bem próximo do sinal de saída medido, com erros de avaliação analíticos menores do que 10%, conforme pode ser observado nas figuras 6.8 a 6.11.

Quanto ao deslocamento correspondente à carga máxima, não foi

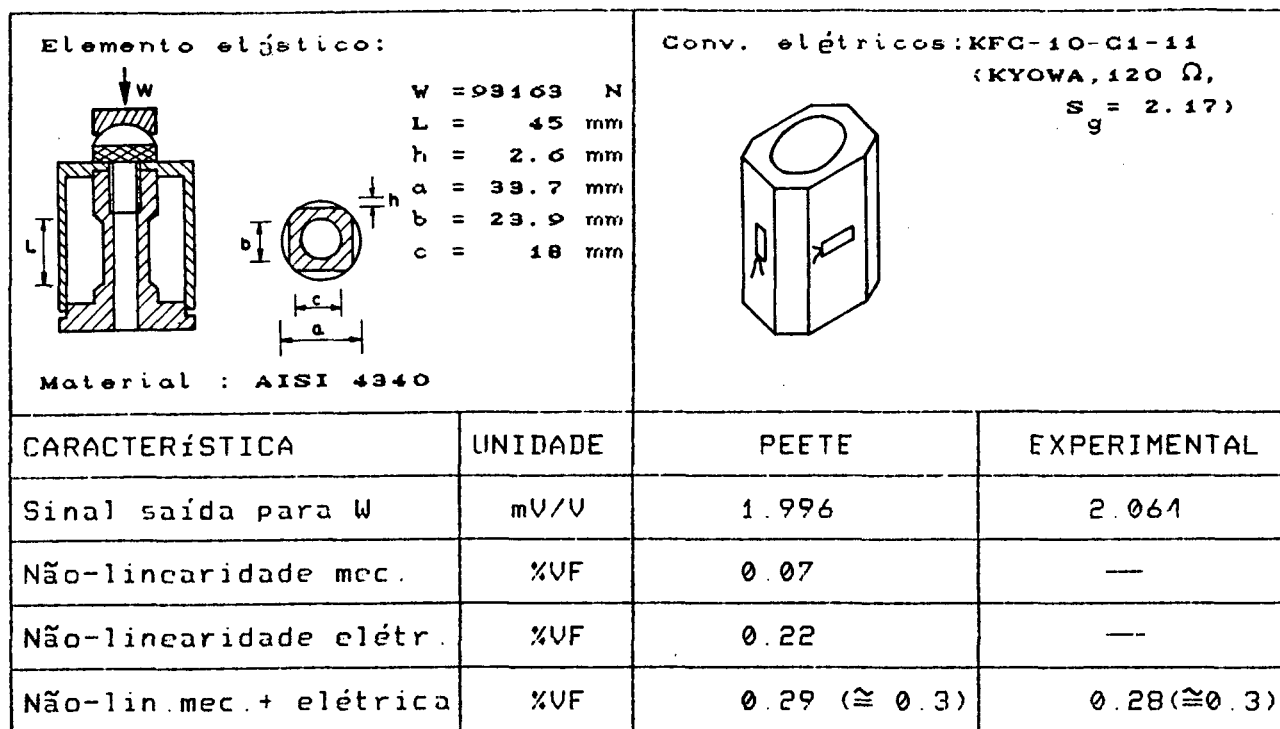


Fig. 6.8 - Comparação dos resultados para transdutores de força tipo coluna.

possível medi-lo corretamente, a fim de comparar com o valor calculado, pelas razões expostas no item 6.2. Mas isso é irrelevante, pois os elementos elásticos tipo coluna são usados, quase que exclusivamente, com conversores extensométricos.

Na determinação do polinômio de ajuste da curva de calibração de transdutores de força tipo coluna, sabe-se que, para o caso de cargas de compressão (secção transversal aumenta), os termos de ordem ímpar têm valores predominantes [40]. Todos protótipos testados foram submetidos à compressão e observou-se que a não-linearidade experimental, obtida com um polinômio do segundo grau, apresentou diferença considerável da obtida com polinômios do terceiro grau (por exemplo, no caso da figura 6.8, obteve-se 0.3%VF com polinômio do segundo grau e 0.6%VF com polinômio do terceiro grau). Neste trabalho, para os protótipos de transdutores tipo

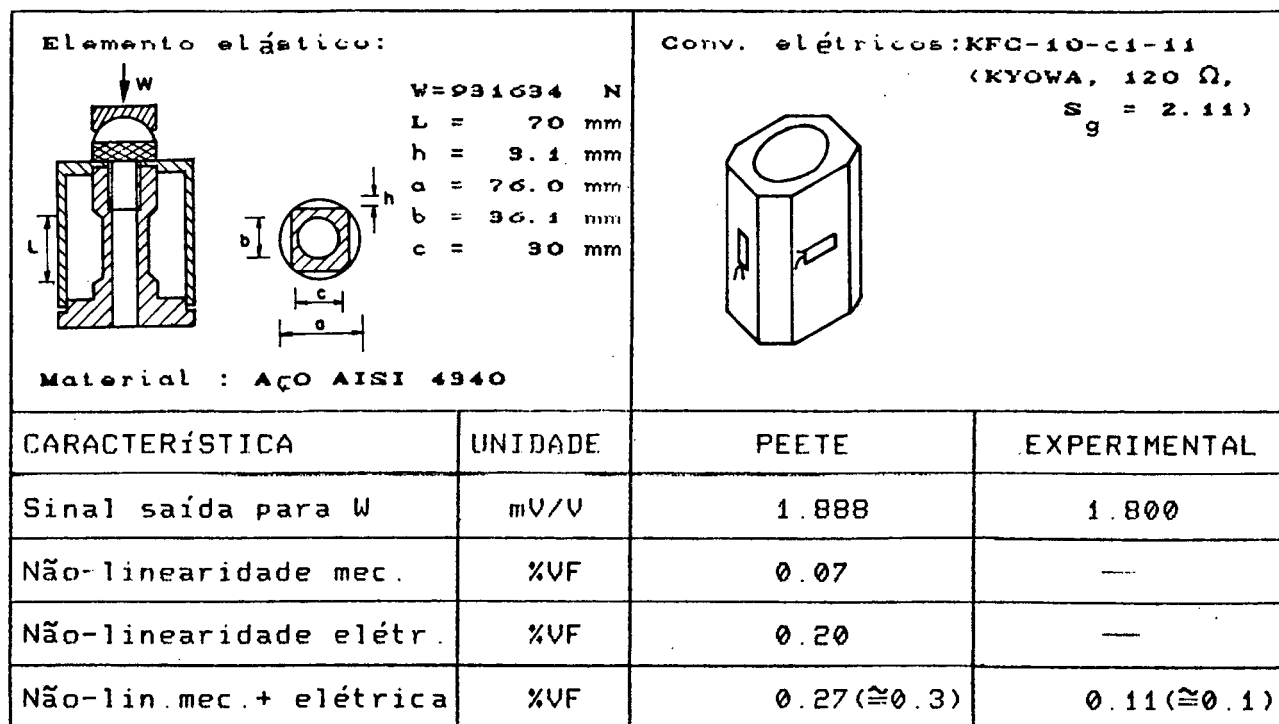


Fig. 6.9 - Comparação dos resultados para transdutores de força tipo coluna.

coluna testados, adotou-se a não-linearidade experimental obtida com um polinômio do segundo grau, porque a não-linearidade analítica é determinada com uma expressão aproximada, que pode ser deduzida ao arranjar a expressão do sinal de saída, na forma de um polinômio do segundo grau (ver anexo B).

Na comparação dos valores analíticos e experimentais da não-linearidade dos protótipos de transdutores de força tipo coluna testados, o da figura 6.11 apresentou maior diferença entre tais valores. O comportamento experimental não-linear, mais acentuado, justifica-se pelo fato desse protótipo ser um tubo de parede delgada, relativamente longo, tendo assim rigidez flexional comparativamente menor (comportamento de viga em compressão [77]). Além disso, houve a contribuição da carga ser transmitida parcialmente através de um dispositivo roscado. O protótipo da

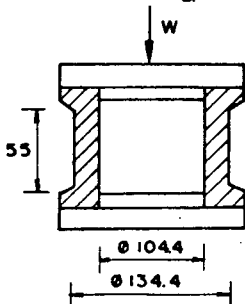
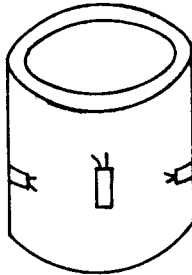
<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 931634 \text{ N}$ $L = 55 \text{ mm}$ </p> <p>Material : Aço carbono</p>		<p>Conv. elétricos: 120Ω, $S_g = 2$</p> 	
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	EXPERIMENTAL
Sinal saída para W	mV/V	1.025	1.134
Não-linearidade mec.	%VF	0.04	—
Não-linearidade elétr.	%VF	0.11	—
Não-lin.mec. + elétrica	%VF	0.15($\cong 0.2$)	0.23($\cong 0.2$)

Fig. 6.10 - Comparação dos resultados para transdutores de força tipo coluna.

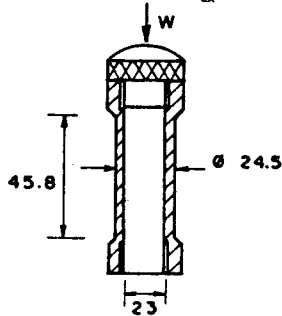
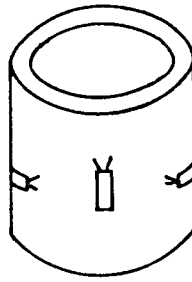
<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 19613 \text{ N}$ $L = 45.8 \text{ mm}$ </p> <p>Material : AISI 4340</p>		<p>Conv. elétricos: 120Ω, $S_g = 2$</p> 	
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	EXPERIMENTAL
Sinal saída para W	mV/V	2.170	2.022
Não-linearidade mec.	%VF	0.08	—
Não-linearidade elétr.	%VF	0.23	—
Não-lin.mec. + elétrica	%VF	0.31($\cong 0.3$)	0.83($\cong 0.8$)

Fig. 6.11 - Comparação dos resultados para transdutores de força tipo coluna.

figura 6.10 é o único sem influência deste tipo de dispositivo, sendo por isso confiável e serve para mostrar que a formulação analítica empregada dá uma boa aproximação da não-linearidade de elementos elásticos tipo coluna.

Embora não sendo realizada uma comparação do deslocamento, a formulação analítica empregada para os elementos elásticos tipo coluna deu uma boa aproximação para o projeto preliminar.

6.3.4 Elementos elásticos tipo anel

Os dois elementos elásticos tipo anel analisados são mostrados nas figuras 6.12 e 6.13. Como se pode observar nos seus desenhos esquemáticos, existem ressaltos cilíndricos para fixar os dispositivos de aplicação de cargas. Na bibliografia eles são denominados *bosses* e, da mesma forma como nas placas circulares, têm influência na formulação analítica.

O primeiro elemento analisado foi o anel quadrado. A sua formulação analítica inicial desenvolveu-se sem considerar os *bosses* e, com essa mesma simplificação, foi analisado também por elementos finitos. Os resultados de ambos métodos apresentaram boa coincidência ao serem comparados entre si. Mas, ao serem comparados com resultados de testes experimentais, ocorreram diferenças consideráveis. Por isso refez-se a formulação analítica de todos anéis do programa PEETE (ver anexo B), levando em conta a rigidez dos *bosses*. O resultado dessa modificação é mostrado para o anel quadrado na figura 6.12, com valores analíticos aceitáveis para uma formulação aproximada.

Para a variação de anel da figura 6.13, usou-se um dos

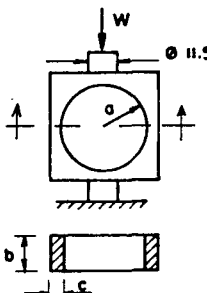
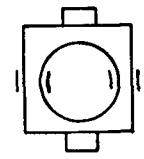
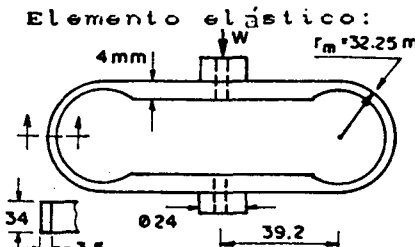
<p>Elemento elástico:</p>  <p> $W = 981 \text{ N}$ $a = 12.7 \text{ mm}$ $b = 12.0 \text{ mm}$ $c = 2.1 \text{ mm}$ </p> <p>Material : Aço carbono</p>		<p>Conv. elétricos: 120Ω, $S_g = 2$</p> 	
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	EXPERIMENTAL
Deslocamento max. p/W	mm	0.036	0.028
Sinal saída para W	mV/V	1.176	1.163
Não-linearidade mec.	%VF	0.17	—
Não-linearidade elétr.	%VF	0.05	—
Não-lin.mec.+ elétrica	%VF	0.22($\cong 0.2$)	0.12($\cong 0.1$)
Freq. natural c/carga	Hz	83	94
Freq. natural livre	kHz	5.91	—

Fig. 6.12 - Comparação dos resultados para transdutores de força tipo anel.

protótipos mostrados na referência [21], para os quais dispõe-se apenas dos resultados do deslocamento experimental e do deslocamento de elementos finitos. O valor de deslocamento, obtido com o programa PEETE, é aceitável para uma formulação analítica aproximada.

Na bibliografia têm sido comentados o fato de ser difícil obter uma formulação analítica adequada e a questão de modelar corretamente o elemento elástico tipo anel com elementos finitos. A formulação analítica, usada no programa PEETE, não é tão rigorosa quanto algumas encontradas nas publicações específicas [20,29]. Mas, através dos casos analisados, mostrou-se que pode ser usada

<p>Elemento elástico:</p> 		<p>Conv. elétricos :</p> <p>Para rodar programa PEETE, utilizou-se conversor LVDT com :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faixa de medição : ± 2 mm - Resolução : $0.1 \mu\text{m}$ - Sensibilidade : $200 \mu\text{m/V}$ 		
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	PEETE	E. FINITOS	EXPERIM.
Deslocamento max. p/W	mm	1.096 ^(*)	0.978 ^[21]	0.936 ^[21]
Não-linearidade mec.	%VF	-0.34	---	---
Freq. natural c/carga	Hz	15	---	---
Freq. natural livre	kHz	0.43	---	---

(*) : obtido com largura de bosse equivalente $L_b = \frac{\pi \cdot 24^2 / 4}{2 \times 34} = 6.65 \text{ mm}$

Fig. 6.13 - Comparação dos resultados para transdutor de força tipo anel.

com boa aproximação para projeto preliminar de tais elementos.

6.3.5 Resumo

Os resultados de deslocamento, frequência natural e não-linearidade, que puderam ser comparados com resultados experimentais ou de elementos finitos, mostraram a validade da formulação analítica para um projeto preliminar dos elementos elásticos considerados.

O critério mais importante, usado para analisar a validade da formulação analítica, foi o de erro de avaliação do sinal de saída menor do que 10%. Com esse critério chegou-se às seguintes conclusões, relativas ao tipo de elemento elástico:

- A formulação analítica, para elementos elásticos tipo placa circular, dá resultados com boa aproximação, dentro dos seus

limites de validade e, próximo ou fora deles, serve como uma primeira aproximação para projeto preliminar;

- A formulação analítica, dos elementos elásticos tipo coluna testados é simples e confiável, principalmente na determinação do sinal de saída de transdutores extensométricos, e dá uma boa aproximação para o projeto preliminar de tais elementos.
- A formulação analítica para os elementos elásticos tipo anel não é tão rigorosa quanto algumas encontradas na bibliografia. Mas, conforme os casos analisados, pode ser usada com aproximação aceitável no projeto preliminar deles;
- Erros de avaliação podem ser reduzidos a valores inferiores a 10%, corrigindo a formulação analítica de cada família de elementos elásticos de mesma forma, através do método de elementos finitos.

7. ANÁLISE DE PROJETOS OBTIDOS COM O PROGRAMA IMPLEMENTADO

7.1 OBJETIVOS, CRITÉRIOS DE PROJETO E PROCEDIMENTO DA ANÁLISE

7.1.1 Objetivos da análise

Usou-se o programa PEETE para produzir, sistematicamente, projetos de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial. Esses projetos foram submetidos a uma análise com a finalidade de:

- Determinar os limites práticos de um grupo de características examinadas;
- Avaliar características de transdutores de força de mercado, em relação a esses limites;
- Propor recomendações de formas adequadas de elementos elásticos para aplicações específicas, empregando conversores extensométricos ou indutivos.

As características examinadas são as seguintes:

- Valor final (VF) da faixa de medição (N);
- Resolução de entrada relativa (%VF);
- Deslocamento para VF (mm);
- Frequência natural para VF (Hz);
- Frequência natural livre de carga (kHz);
- Sinal de saída relativo para VF (mV/V);
- Não-linearidade (%VF);
- Tamanho do elemento elástico (base X altura) (mmXmmXmm);
- Volume do elemento elástico (mm³);
- Máxima quantidade de informação (bit);

- Máxima capacidade de canal (bit/s).

Os seus limites práticos servem de referência para a avaliação das características de transdutores de mercado, mostradas no anexo A, e para propor recomendações de formas de elementos elásticos específicas e básicas (vigas, placas, etc.), como segue:

- Formas específicas e básicas para faixas de valores finais VF, tanto usando conversores extensométricos quanto indutivos;
- Formas básicas para os princípios extensométricos e indutivos, quando se consideram sinal de saída, resolução e quantidade de informação;
- Formas básicas em função de tamanho e volume de elemento elástico, e valores finais VF;
- Formas básicas em função do deslocamento para VF;
- Formas básicas em função da não-linearidade;
- Formas básicas em função de frequência natural e capacidade de canal.

Um exemplo típico, onde essas recomendações são úteis, é o de determinar a forma do elemento elástico e o tipo de conversor (extensométrico ou indutivo), para se obter um transdutor com pequena relação altura/diâmetro, tendo uma faixa de medição especificada.

7.1.2 Restrições e Critérios de projeto

As aplicações de transdutores de força podem gerar um número bastante elevado de soluções, envolvendo as características examinadas, devido às diferentes exigências aos seus valores, e às diferentes combinações entre forma-material do elemento elástico e

características de conversores elétricos. Para diminuir tal número e viabilizar a análise contribuíram:

- Os critérios de projeto estabelecidos a seguir;
- Os dois distintos materiais de elementos elásticos usados nos projetos (aço AISI 4340 e alumínio ASTM 2024-T81);
- Os dois conversores de princípios extensométrico e indutivo especificados para os projetos.

Os critérios de projeto, estabelecidos para gerar soluções otimizadas, são:

- Máxima faixa de valores finais VF realizáveis na prática;
- Máximo sinal de saída possível;
- Mínimos tamanho e volume;

sob restrições impostas com base em valores práticos e usuais das características:

- Resolução $\leq 1 \%VF$;
- Deslocamento para VF $\geq 0.001 \text{ mm}$;
- Frequência natural com carga $> 15 \text{ Hz}$;
- Não-linearidade mecânica $< 1 \%VF$;
- Não-linearidade elétrica $< 1 \%VF$.

No PEETE, a resolução é calculada em valor absoluto (ver capítulo 5). Para verificar o seu limite percentual máximo nos projetos, optou-se pela observação indireta, através do sinal de saída relativo, cujos limites mínimos são determinados, para conversores extensométricos e indutivos, em função de características adotadas, como segue.

Conversores extensométricos, ligados em ponte de Wheatstone, dão sinal de saída relativo $X_g = S_g \bar{\epsilon} / 4$ (ver capítulo 4). Com a resolução limite máxima imposta de $1\%VF$, ou seja, $\delta \bar{\epsilon} / \bar{\epsilon} = 0.01$, onde se adota $\delta \bar{\epsilon} = 1 \mu\text{m/m}$, obtém-se $\bar{\epsilon} = 100 \mu\text{m/m}$. Então, sendo $S_g = 2$, da

expressão anterior do sinal de saída, resulta o sinal mínimo $X_s = 0.050 \text{ mV/V}$.

Nos conversores indutivos, $X_s = S_c v$. Com $\delta v/v = 0.01$ e $\delta v = 0.01 \mu\text{m}$, obtém-se $v = 1 \mu\text{m}$. Então, sendo $S_c = 100 \text{ mV/V/mm}$, resulta o sinal mínimo $X_s = 0.100 \text{ mV/V}$.

Portanto, as restrições de projeto admitidas para o sinal de saída relativo são:

- Conversores extensométricos..... $\geq 0.050 \text{ mV/V}$;
- Conversores indutivos..... $\geq 0.100 \text{ mV/V}$.

Os dois materiais empregados foram alumínio ASTM 2024-T81 e aço AISI 4340, ambos os melhores recomendados na bibliografia [69], para suas utilizações em transdutores de força.

O projeto de elementos elásticos de aço, sob cargas relativamente baixas, pode resultar em dimensões delgadas, comprometendo a sua estabilidade estrutural ou dificultando a fabricação. Para resolver isso, usou-se o alumínio que, por sua vez, transfere o problema para cargas ainda menores. O aço foi empregado a partir das cargas para as quais as dimensões resultantes são obtidas por processos comuns de fabricação. Ele também foi utilizado em projetos sob cargas altas, para obter os menores tamanhos de elementos elásticos.

Os conversores elétricos especificados existem no mercado e foram escolhidos com tamanhos relativamente pequenos, para minimizar o tamanho dos elementos elásticos. Suas especificações são:

- Conversores extensométricos:

Fabricante	Micro-Measurement,
Designação	MA-06-030CG-120,
Sensibilidade do extensômetro	2.05,

Deformação admissível1500 $\mu\text{m/m}$,
 Comprimento da matriz3.6 mm,
 Largura da matriz2.8 mm,
 Mínima def. possível de ser tratada ...0.6 $\mu\text{m/m}$,
 Alimentação da ponte de Wheatstone ...10 V.

- Conversor indutivo:

FabricanteSchaevitz,
 Designação050 MHR (LVDT),
 Faixa de medição ± 1.27 mm,
 Resolução adotada0.0127 μm (0.001%VF),
 Sensibilidade318 mV/mm,
 Saída relativa135 mV/V,
 Alimentação3 Vrms,
 Diâmetro10 mm,
 Comprimento20 mm,
 Frequência portadora.....2.5 kHz,
 Não-linearidade0.20 %VF,
 Massa.....5.4 g.

Nota-se que os valores da deformação mínima possível de ser tratada e da resolução do conversor indutivo, foram adotados de modo a proporcionar resoluções teóricas desde 0.001 %VF. Esse limite inferior foi arbitrado com tão pequeno valor, meramente para obter-se uma ampla gama de resoluções, até o máximo de 1%VF.

7.1.3 Procedimento de análise

Nos projetos obtidos com o programa PEETE, foram exploradas as 36 variações de elementos elásticos, combinando-as com os princípios de conversão elétrica usados, e considerando cargas de

tração e compressão. Foram utilizadas 49 combinações forma-princípio, para obter os valores VF da característica mais importante na análise do programa PEETE, a faixa de medição.

Os limites extremos de cada faixa de valores VF, correspondentes a cada combinação de forma e princípio, foram obtidos realizando sucessivos dimensionamentos da mesma forma, para valores crescentes de cargas finais (... , 0.01 N, 0.1 N, 1 N, 10 N, ...), respeitando as restrições e os critérios de projeto anteriormente estabelecidos.

Os limites extremos inferiores foram estabelecidos decidindo entre:

- Dimensões mínimas possíveis de serem produzidas no elemento elástico;
- Limites mínimos do sinal de saída.

Os limites extremos superiores foram estabelecidos adotando os seus menores valores, decidindo entre:

- Razão de crescimento do volume excessiva;
- Tamanho excessivo (diâmetro X altura ou base X altura).

Para valores crescentes das cargas finais (... , F_i , F_{i+1} , ...), corresponderam volumes crescentes (... , V_i , V_{i+1} , ...) de elementos elásticos e razões de crescimento de volume (... , $r_i = V_i / V_{i-1}$, $r_{i+1} = V_{i+1} / V_i$, ...) que se mantinham aproximadamente constantes.

Quando a razão de crescimento do volume (r_{i+2}) excedia seu valor aproximadamente constante ($r_i \cong r_{i+1}$), adotava-se o limite extremo superior (F_{i+1}), correspondendo ao valor imediatamente abaixo do excedente (F_{i+2}). Quanto ao tamanho, os limites superiores foram estabelecidos de modo subjetivo, rejeitando dimensões relativamente exageradas.

Os valores das outras características examinadas foram obtidos daqueles dimensionamentos, sob as mesmas restrições e critérios de projeto, e adotando seus limites extremos entre os valores determinados para as cargas dentro dos limites extremos de VF.

7.2 RESULTADOS DA ANÁLISE

Os resultados da análise de projetos obtidos com o programa PEETE estão resumidos em tabelas (anexo C), organizadas de modo a evidenciar os limites das características examinadas, em função de formas específicas de elementos elásticos e dos princípios extensométrico e indutivo.

A seguir, tais limites são comparados com os de transdutores existentes, para cada característica examinada, e são indicadas recomendações a respeito da forma dos elementos elásticos.

7.2.1 VF - Valor final da faixa de medição

Nas figuras 7.1 até 7.4, mostram-se os limites das faixas de valores VF obtidos. Eles são resumidos na figura 7.5, em termos das formas básicas viga, placa circular, anel e coluna, e comparados com as faixas de VF de transdutores de força de mercado. Nota-se que os limites determinados abrangem os de transdutores de mercado. Além disso, considerando apenas as faixas de medição, anéis e placas circulares são desnecessários, pois podem ser substituídos por vigas, enquanto colunas têm aplicação para cargas relativamente altas.

Na figura 7.5, observa-se nitidamente a vantagem de usar conversores indutivos para cargas baixas, e também que existem

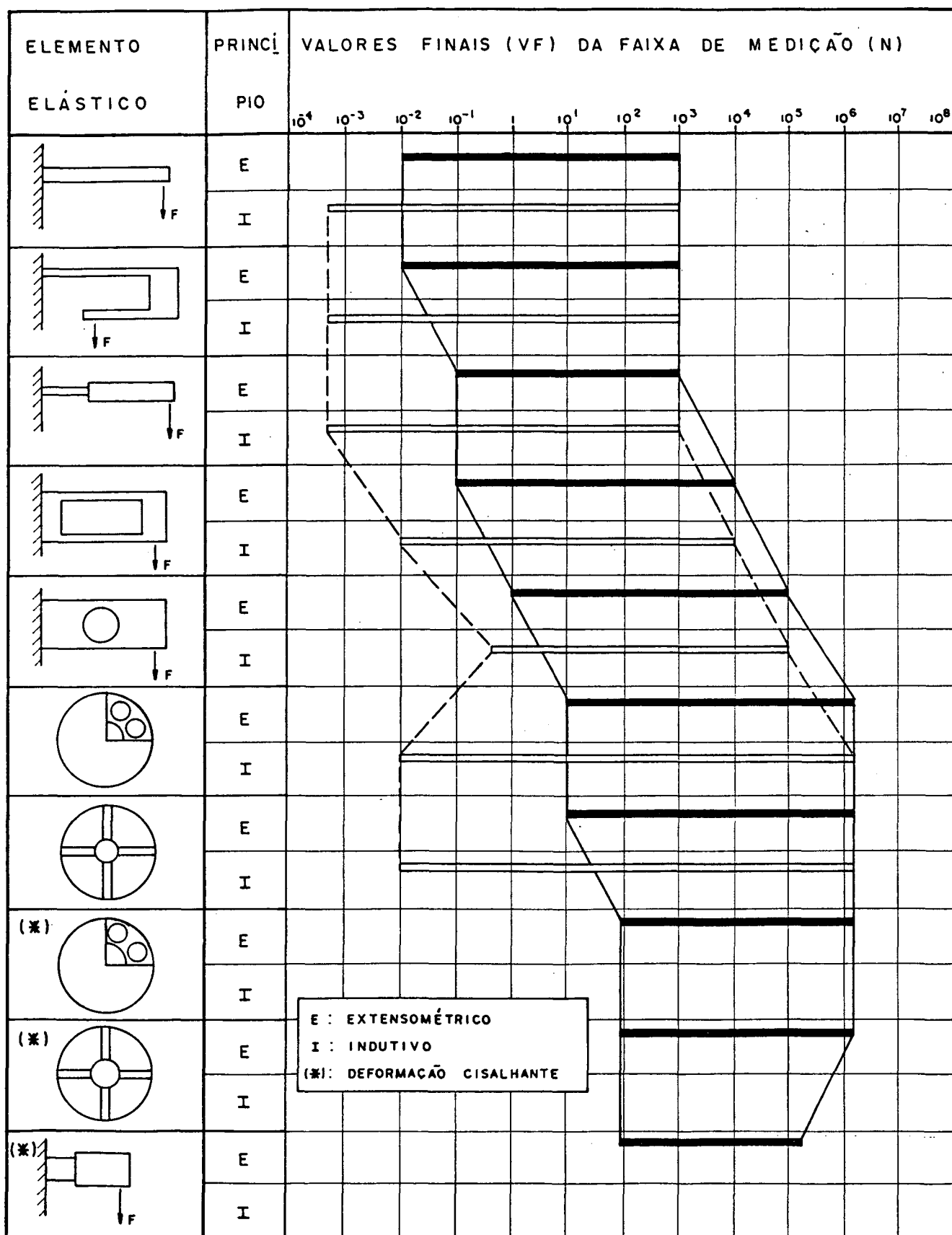
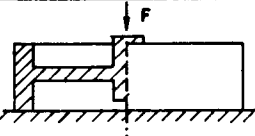
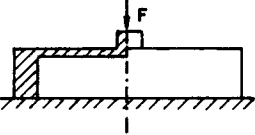
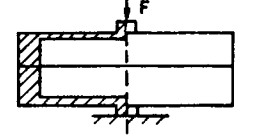
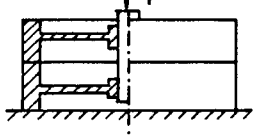
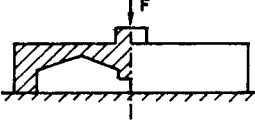


Fig. 7.1 - Faixas de valores finais VF para vigas com conversores extensométricos ou indutivos.

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	VALORES FINAIS (VF) DA FAIXA DE MEDIÇÃO (N)											
		10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												

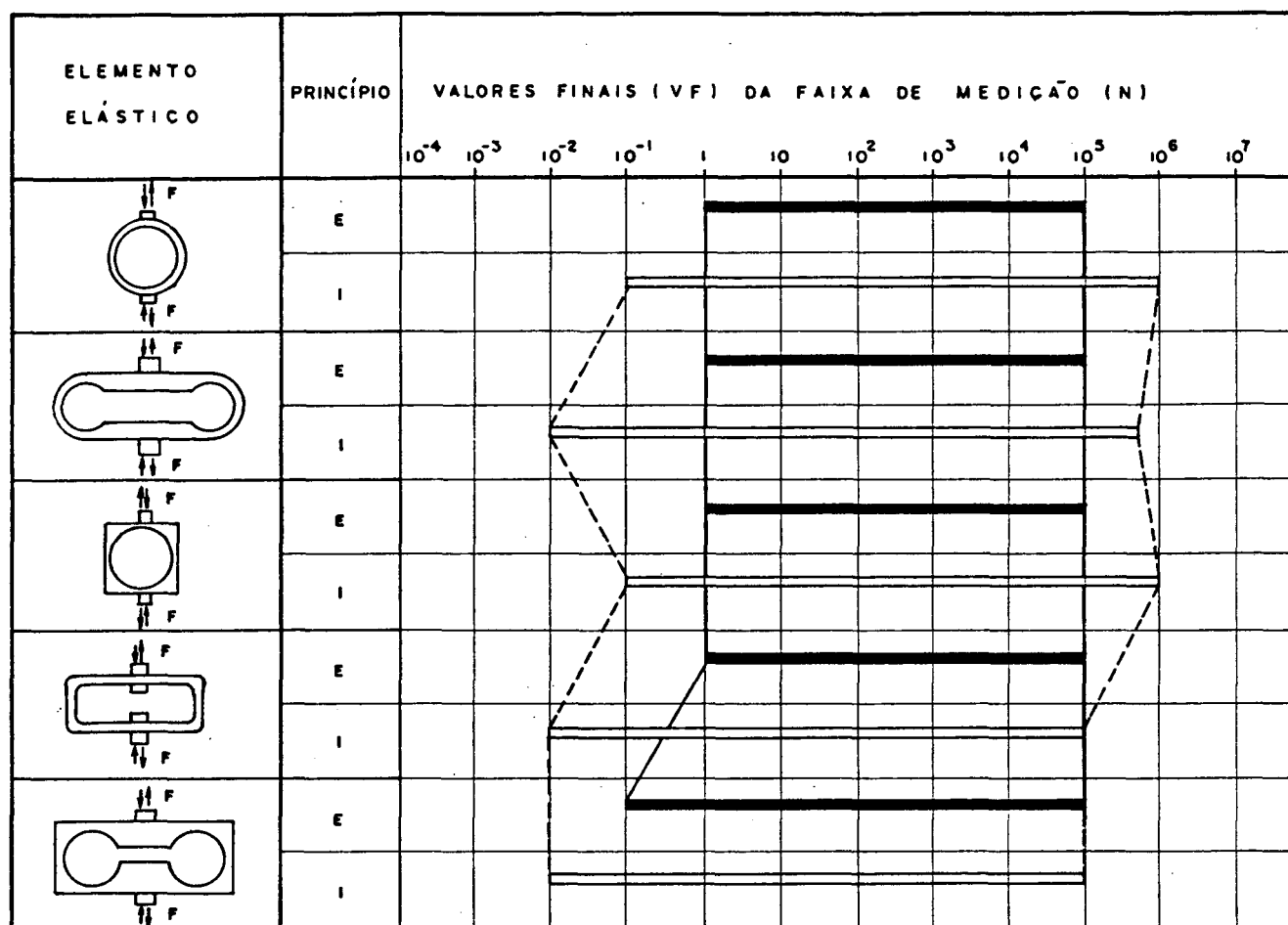
E : EXTENSOMÉTRICO

I : INDUTIVO

Fig. 7.2 - Faixas de valores finais VF para placas circulares com conversores extensométricos ou indutivos.

faixas de valores VF não aproveitadas pelos fabricantes, como são os casos de cargas baixas em anéis, e cargas altas em vigas com indutivo.

O fato de conversores indutivos proporcionarem os transdutores de força de menores cargas pode ser justificado, tomando como exemplo o elemento viga em balanço da figura 4.1. A relação entre a maior deformação específica ϵ e o maior deslocamento v daquele elemento, para uma carga aplicada em seu extremo livre é $\epsilon = (h/L^2)v$



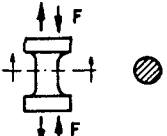
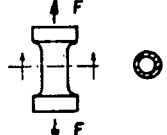
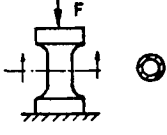
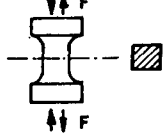
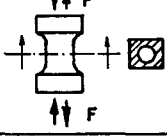
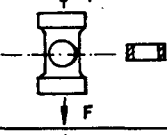
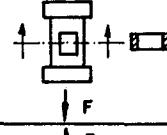
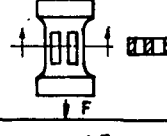
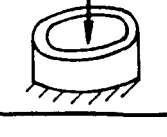
E : EXTENSOMÉTRICO

I : INDUTIVO

Fig. 7.3 - Faixas de valores finais VF para anéis com conversores extensométricos ou indutivos.

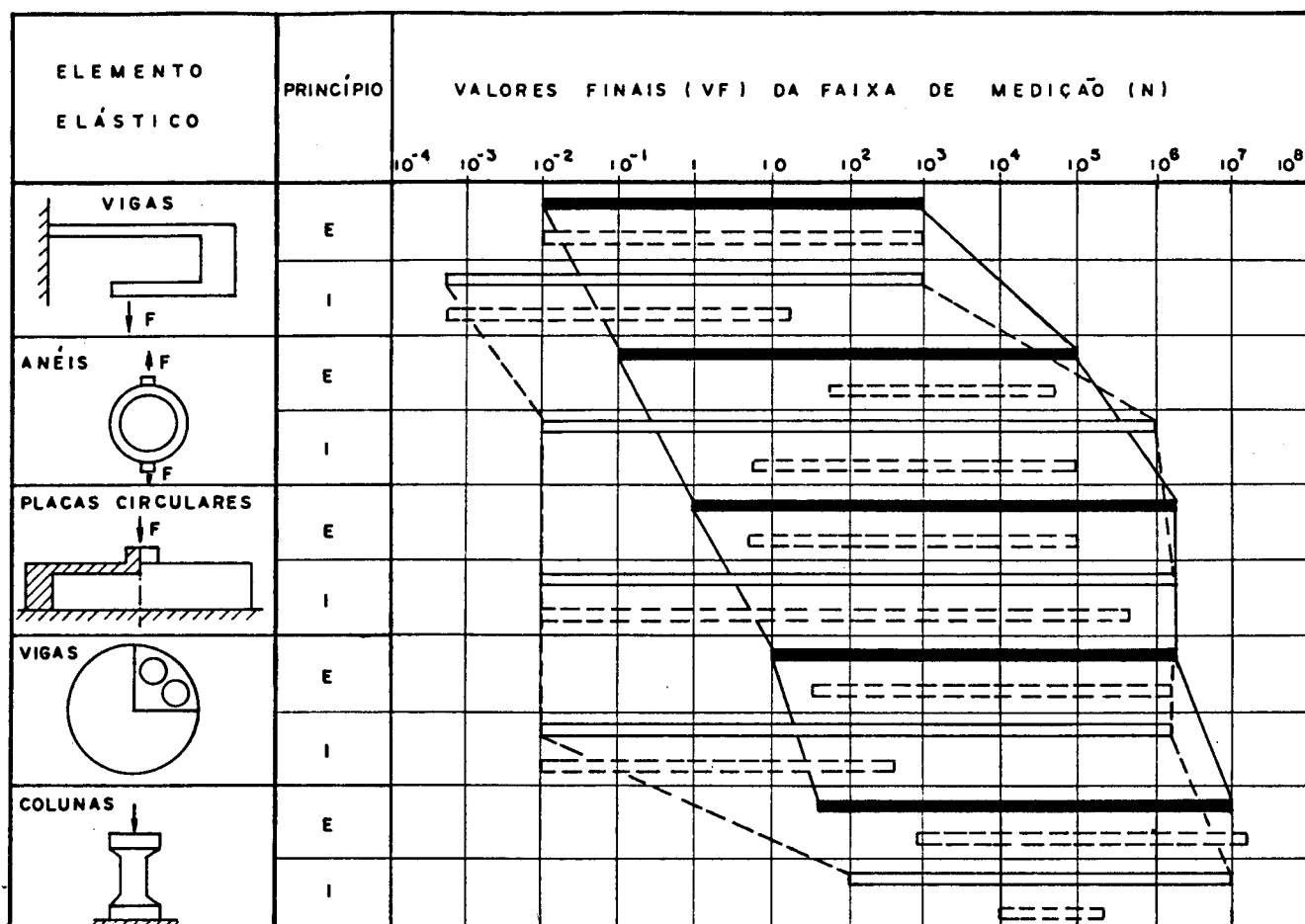
(h é a espessura e L o comprimento da viga). Assim, sem considerar outras restrições de projeto, sendo $v = 0.0127 \mu\text{m}$ (valor mínimo usado na análise e detectável com transdutores indutivos), dificilmente se poderá detectar o valor de deformação correspondente ($0.0127h/L^2 \mu\text{m/m}$), que é bem menor do que o mínimo de $0.6 \mu\text{m/m}$, admitido na análise.

Na figura 7.6, faz-se uma comparação de valores VF para um tipo de forma específica de elementos elásticos, as vigas duplas.

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	VALORES FINAIS (VF) DA FAIXA DE MEDIÇÃO (N)											
		10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												
	E												
	I												

E : EXTENSOMÉTRICO
I : INDUTIVO

Fig. 7.4 - Faixas de valores finais VF para colunas com conversores extensométricos ou indutivos.



E : EXTENSOMÉTRICO

I : INDUTIVO

--- : TRANSDUTORES DE MERCADO [11]

Fig. 7.5 - Comparação dos valores finais VF, obtidos no PEETE, com os VF de transdutores de mercado.


FONTE	Faixa de valores VF (N)							
	10^{-1}	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
PEETE								
Ref.[11]	-----							
Ref.[84]							

Fig. 7.6 - Comparação dos valores VF, obtidos no PEETE, com os VF de transdutores de força extensométricos comerciais, tendo elementos elásticos tipo viga dupla.

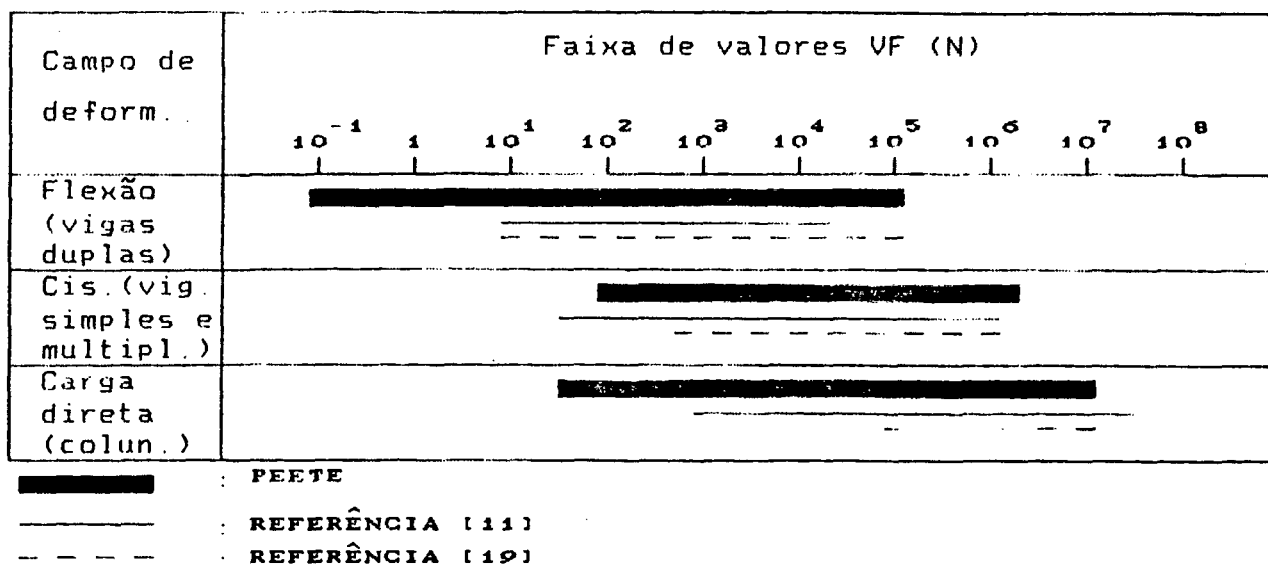


Fig. 7.7 - Comparação dos valores VF, obtidos com o PEETE, com os VF de transdutores de força extensométricos comerciais, tendo elementos elásticos tipo viga e coluna.

Nota-se que, com o PEETE, pode-se obter uma faixa de valores VF desde 0.1 até 2×10^5 N e que existe uma faixa de valores de 0.1 até 10 N, não aproveitada pelos fabricantes.

Na figura 7.7, os valores limites de VF são mostrados em termos dos tipos de campo de deformação (flexão, cisalhamento ou carga direta) em elementos elásticos vigas e colunas, de transdutores extensométricos. Na comparação de valores, constata-se que, praticamente, as faixas de valores VF, obtidas com o PEETE, abrangem as faixas VF de transdutores de mercado.

Assim, considerando somente os valores finais VF da faixa de medição, os resultados da análise do PEETE, quanto às formas de elementos elásticos, resumem-se em:

- Os limites de valores VF, mostrados nas figuras 7.1 até 7.4, servem como recomendações para formas específicas de elementos elásticos;
- É desnecessário usar elementos em forma de anéis e placas

nos transdutores de força;

- São suficientes duas formas de viga (uma simples e uma múltipla) para cobrir a gama de valores VF que se obteve com todos elementos viga analisados (figura 7.5);
- Exceto colunas, o emprego dos outros 3 tipos de elementos elásticos, e conversores indutivos, proporcionou faixas de valores VF mais amplas do que as obtidas com extensômetros resistivos, tendo vantagem nos limites inferiores de VF (figura 7.5);
- A comparação com transdutores de mercado, revela que existem faixas de valores não aproveitadas pelos fabricantes, notadamente em elementos elásticos dos tipos anel (cargas baixas) e vigas com conversores indutivos (cargas altas).

7.2.2 Sinal de saída, resolução e quantidade de informação

Examinando os resultados da análise, nota-se que resolução, quantidade de informação e sinal de saída são características que praticamente dependem só dos princípios de conversão elétrica usados. Suas faixas de valores têm as maiores amplitudes quando se usa conversor indutivo. Isso se justifica pelo fato destes terem sensibilidade de conversão bem maior do que os conversores extensométricos (na análise empregou-se 106 V/V/m para indutivos e 0.51 V/V/m/m para extensométricos).

Agrupando as características examinadas, em função dos princípios de conversão, no quadro que segue, aparecem claramente as diferenças de amplitudes das faixas de seus valores.

O comportamento médio dessas características é mostrado na figura 7.8 em função do princípio de conversão e dos valores VF,

Princípio de conversão	VF da faixa de medição (N)	Resolução (% VF)	Sinal de saída p/VF (mV/V)	Quant. de inform. (bit)
Extensométrico	0.01	0.30	0.100	7
	10 000 000	0.01	3.000	12
Indutivo	0.0005	0.90	0.150	6
	10 000 000	0.002	80.000	15

relativos ao máximo valor VF_{max} , obtido de cada forma de elemento elástico. Nota-se que a faixa de valores relativos (% VF_{max}) é mais ampla quando se usa conversor indutivo e que este tem a vantagem de proporcionar os menores valores relativos, confirmando observações e justificativas anteriores.

Na figura 7.9 são comparados os valores de sinal de saída relativo e resolução, obtidos no PEETE, com os respectivos valores de transdutores de força existentes.

Os limites superiores do sinal de saída, obtidos com o

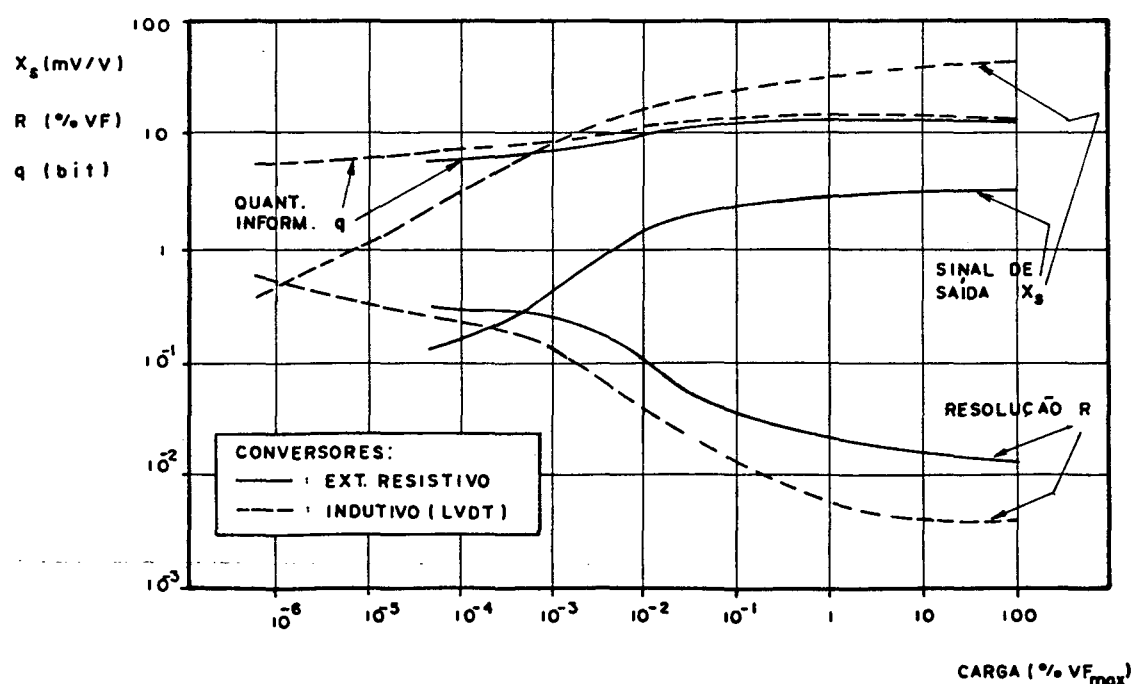


Fig. 7.8 - Comportamento do sinal de saída, resolução e quantidade de informação em função dos valores VF.

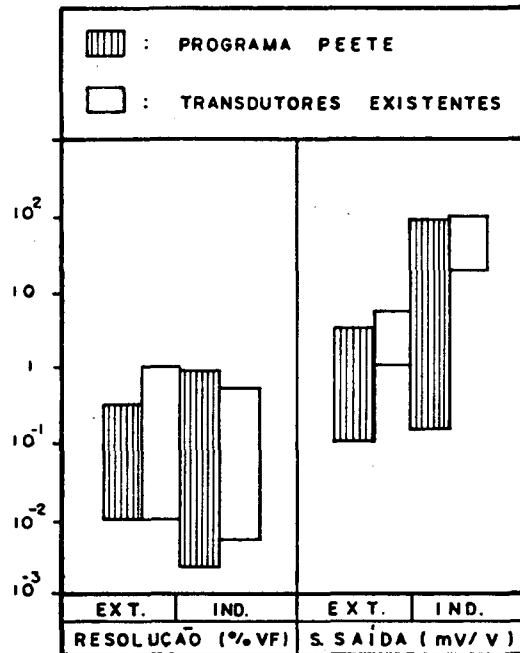


Fig. 7.9 - Comparação dos valores de sinal de saída e resolução, obtidos no PEETE, com os respectivos valores de transdutores de força existentes.

programa PEETE, estão pouco abaixo dos mesmos limites de transdutores existentes. Eles podem ser elevados facilmente, alterando restrições de projeto da análise, como permitir maior não-linearidade mecânica, trocando o material do elemento elástico, ou especificando conversores elétricos de maior sensibilidade.

Na comparação da resolução, questiona-se a confiabilidade dos valores encontrados em transdutores existentes. Muitos catálogos de fabricantes indicam resolução infinitesimal, impossível na prática. A comparação, através da figura 7.9, mostra que os valores encontrados para transdutores existentes têm uma proximidade com os valores confiáveis, obtidos com o PEETE.

Os valores extremos da quantidade de informação, obtidos na análise do programa, estão entre 6 e 15 bit. Mas, para a maioria dos projetos efetuados, eles estiveram entre 12 e 14 bit, que são valores ora em uso nas especificações de placas A/D, interfaceáveis

a microcomputadores.

Em resumo, a análise do sinal de saída, resolução e quantidade de informação mostrou que:

- Estas características praticamente independem da forma do elemento elástico, mas mudam com as restrições de projeto, com a troca do material do elemento elástico ou dos conversores elétricos;
- Suas faixas de valores têm as maiores amplitudes quando se usa conversor elétrico indutivo;
- As curvas de comportamento inverso entre resolução e sinal de saída, ou resolução e quantidade de informação, determinadas considerando restrições de projeto, constituem ábacos auxiliares em projetos de elementos elásticos de transdutores de força;
- Os limites de resolução, determinados com o PEETE, são confiáveis e merecem mais crédito do que os encontrados nos transdutores existentes.

7.2.3 Tamanho e volume

Os valores dessas características, determinados na análise do programa PEETE, referem-se ao espaço ocupado somente pelas partes do elemento elástico, deformáveis segundo a formulação analítica.

O tamanho é definido por um cilindro que tem a altura e o diâmetro da base do elemento elástico. O diâmetro é adotado como a maior dimensão da base (retangular, circular, etc.).

O volume de placas e colunas calcula-se por área da base X altura e, o de vigas e anéis, por comprimento X largura X altura.

Um resumo dos resultados dessas características, considerando

a influência dos princípios de conversão, é apresentado no quadro que segue, onde se percebe que os seus menores valores correspondem aos extensométricos. Quanto aos maiores valores, praticamente o tipo de conversor não influi.

Princípio de conversão	VF da faixa de medição (N)	VOLUME do elemento elástico (mm ³)	Tamanho do elem. elást. (diamXalt) (mm X mm)
Extensométrico	0.01	12	15 x 0.5
	10 000 000	6.8×10^6	209 x 200
Indutivo	0.0005	60	30 x 0.25
	10 000 000	5.3×10^6	200 x 200

A influência da forma no volume dos elementos elásticos é observada nas curvas de comportamento de seus valores médios (média de dois volumes extremos, correspondentes a cada valor VF), representadas na figura 7.10, em função das formas básicas de elementos elásticos, dos princípios de conversão extensométrico e indutivo, e dos valores finais das faixas de medição, VF. Sobre tais curvas têm-se as seguintes observações:

- O volume cresce com valores VF crescentes;
- Para cargas menores, geralmente obtém-se maior volume quando se usa conversor indutivo, devido ao espaço requerido para a montagem do conversor;
- Para cargas maiores ($> 10^6$ N), o tipo de conversor pouco influi no volume;
- Com anéis e colunas são obtidos os maiores e menores volumes, respectivamente, dentro dos seus limites de VF.

Na figura 7.11 mostra-se a influência da forma no tamanho, através das curvas de valores médios da relação altura/diâmetro, determinadas para as formas básicas de elementos elásticos. Sobre tais curvas têm-se as seguintes observações:

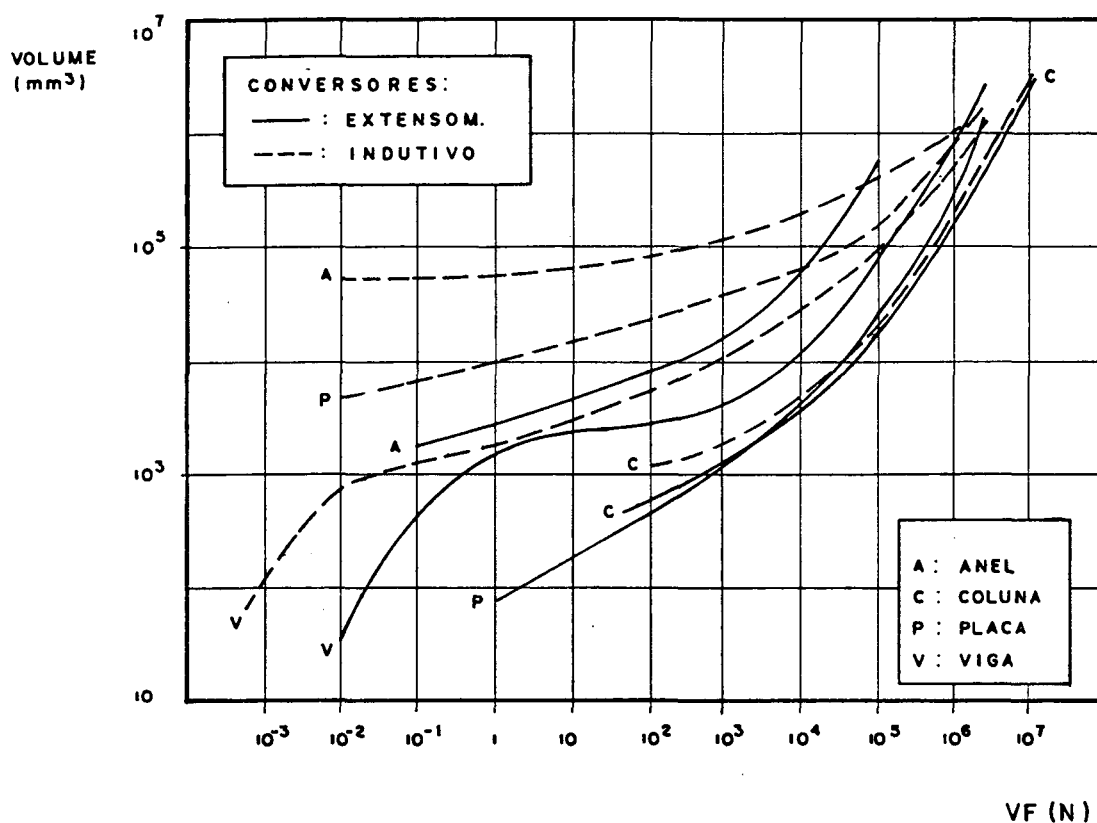


Fig. 7.10 - Comportamento médio do volume dos elementos elásticos básicos, em função dos valores finais V_F das faixas de medição e dos tipos de conversores extensométrico e indutivo.

- Com elementos elásticos tipo coluna, resultam as maiores relações altura/diâmetro;
- As menores relações altura/diâmetro foram obtidas com elementos elásticos tipo placa circular, dentro dos limites de 10^{-2} até 10^5 N;
- Para cargas acima de 10^5 N, as menores relações altura/diâmetro são conseguidas com vigas ou placas;
- As curvas de comportamento altura/diâmetro das vigas têm três trechos distintos: o primeiro (ascendente) caracteriza as vigas simples, o segundo, o grupo de vigas duplas, e o terceiro (descendente), as vigas radiais, que apresentam forma externa semelhante às placas circulares;

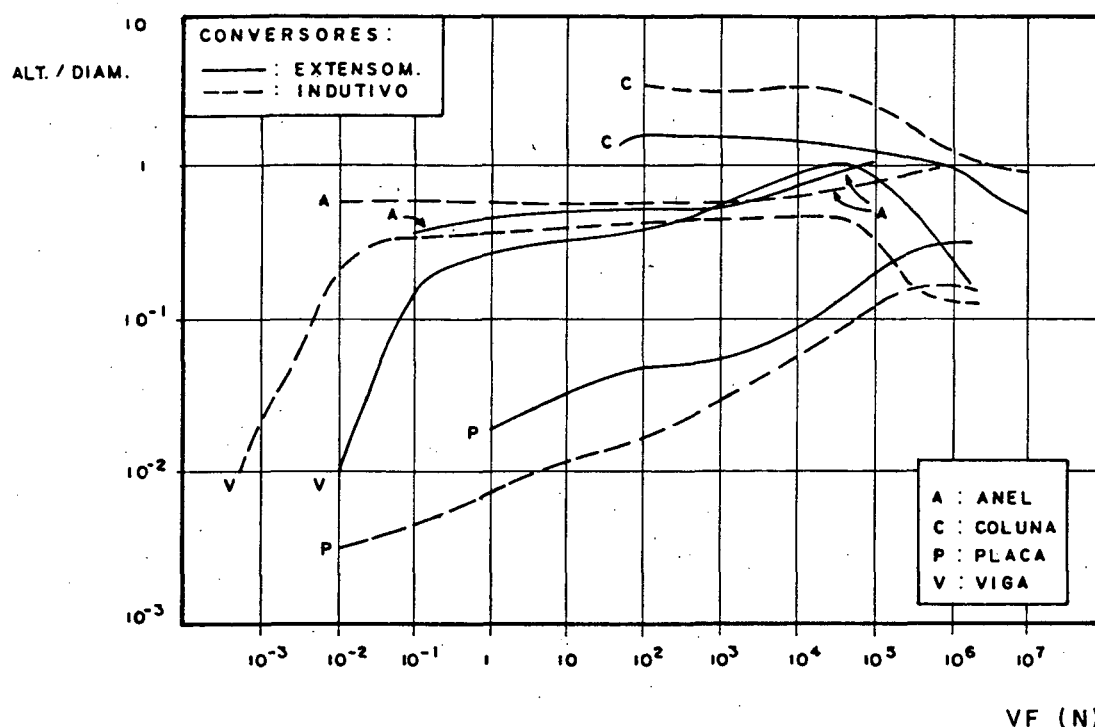


Fig. 7.11 - Comportamento médio altura / diâmetro dos elementos elásticos básicos, em função dos valores VF das faixas de medição e dos tipos de conversores extensométricos e indutivos.

- A relação altura / diâmetro, para anéis, mantém-se aproximadamente constante.

A comparação dos valores de volumes e tamanhos, obtidos no programa PEETE, com os de transdutores existentes, é impraticável porque, para estes, os fabricantes fornecem em catálogos [11] somente as dimensões da estrutura de proteção externa.

Observando os tamanhos limites das estruturas de proteção dos transdutores de força existentes, calcularam-se volumes e relações altura/diâmetro (anexo A). Constatou-se que seus maiores valores ocorrem em transdutores extensométricos com elemento tipo coluna e os menores em transdutores extensométricos com elemento tipo placa circular, quando se consideram as faixas de valores VF apropriadas. Esses resultados são coerentes com as curvas obtidas no PEETE

(figuras 7.10 e 7.11).

Recomenda-se usar as curvas de comportamento do volume e das relações altura/diâmetro como ábacos, para a escolha do elemento elástico básico apropriado, quando o critério de projeto envolve tamanho e volume.

7.2.4 Deslocamento máximo para VF

Os valores limites do deslocamento máximo para VF são representados no quadro seguinte, com o propósito de mostrar a influência da forma dos elementos elásticos básicos e dos princípios de conversão elétrica.

Os limites inferiores praticamente independem da forma de elemento elástico ou do princípio de conversão.

Princípio de conversão	Deslocamento máximo para VF (mm)			
	vigas	placas	colunas	anéis
Extensométrico	0.001	0.008	0.001	0.003
	0.393	0.273	0.300	0.530
Indutivo	0.001	0.005	0.002	0.002
	0.187	0.545	0.172	0.760

Os limites superiores são maiores quando se usa conversor indutivo e, quanto à forma básica, os seus maiores valores foram obtidos para elementos elásticos tipo anel.

Em termos de recomendação para projeto de elementos elásticos, os resultados obtidos servem para mostrar as possibilidades do PEETE, quando se usa deslocamento máximo (para o valor final VF da faixa de medição) como critério de projeto.

Esses resultados são representados também na figura 7.12, e comparados com os limites disponíveis de transdutores existentes.

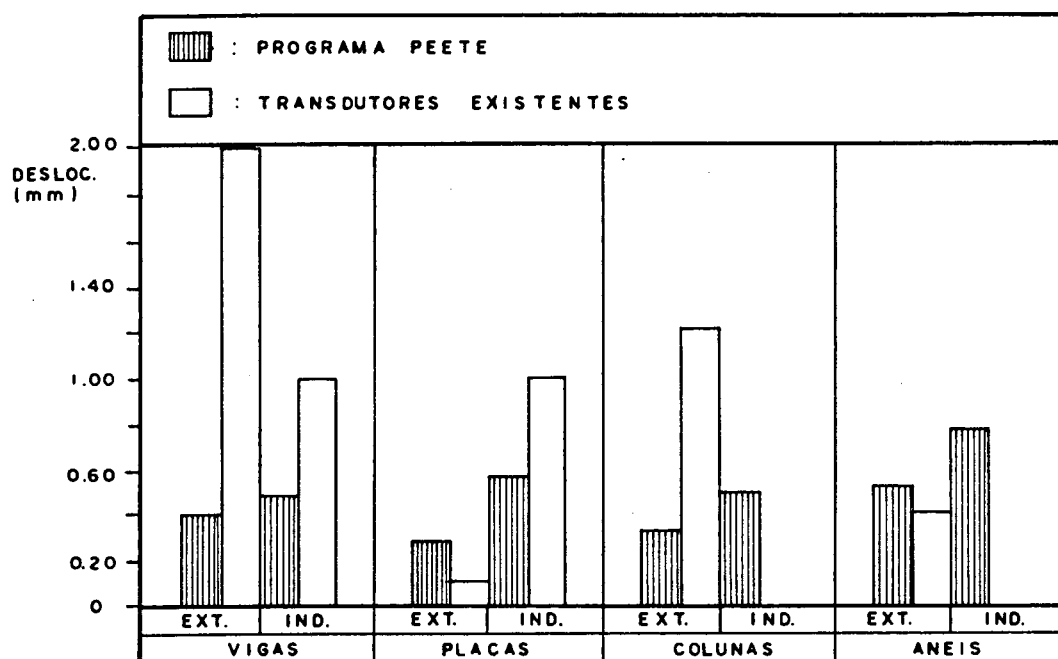


Fig. 7.12 - Comparação dos valores de deslocamento para VF, obtidos no PEETE, com os valores disponíveis de deslocamento de transdutores de força existentes.

Os deslocamentos de transdutores existentes são valores experimentais e representam o comportamento de toda estrutura e não somente do elemento elástico, como é o caso dos que se obtêm com o PEETE. Então, podem ocorrer valores do PEETE inferiores aos disponíveis de transdutores existentes. Isso é nítido na figura 7.12, onde principalmente o limite superior, da faixa de deslocamentos de vigas de transdutores existentes, atinge um valor relativamente alto, conforme encontrado em dois compêndios de transdutores comerciais consultados [11].

Outro aspecto, desfavorável à comparação, é a insuficiência das informações encontradas, para representar confiavelmente os limites de deslocamento dos transdutores de mercado, como no caso dos indutivos que usam elementos tipo coluna e anel (não indicados na figura 7.12).

De um modo geral, na análise foram obtidas faixas mais baixas e estreitas, possibilitando maiores valores de frequência natural e menores valores de não-linearidade.

7.2.5 Não-linearidade

Os limites das não-linearidades mecânica e elétrica são representados resumidamente nos quadros seguintes, em função das formas básicas de elementos elásticos e dos princípios de conversão usados.

Princípio de conversão	Não-linearidade mecânica (% VF)			
	vigas	placas	colunas	anéis
Extensométrico	0.00	0.00	0.00	0.01
	0.09	0.10	0.08	0.50
Indutivo	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.15	0.09	0.12	0.95

Princípio de conversão	Não-linearidade elétrica (% VF)			
	vigas	placas	colunas	anéis
Extensométrico	0.00	0.00	0.01	0.00
	0.004	0.09	0.22	0.35
Indutivo (*)	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.20	0.20	0.20	0.20

(*) : não-linearidade elétrica independente da forma de elemento elástico.

Quanto à não-linearidade mecânica, os resultados mostram que os valores obtidos com conversores indutivos são maiores do que com extensométricos, para elementos tipos viga, coluna e anel. A não-linearidade mecânica das placas é praticamente a mesma para os

dois princípios de conversão. A influência dos princípios de conversão, na não-linearidade mecânica, definida para esta tese, pode ser desconsiderada porque os limites superiores encontrados mudam, conforme as restrições e critérios de projeto usados. Assim, seria perfeitamente possível obter limites iguais para cada forma básica, tanto com princípio extensométrico quanto indutivo, simplesmente estabelecendo a condição de igualdade e operando o PEETE. Mas a influência das formas básicas é considerável, pois os limites superiores de anéis são elevados em relação aos demais.

Na análise da não-linearidade elétrica, observa-se que os limites obtidos, quando se usa conversor indutivo, são os mesmos dos próprios conversores. Como na análise do programa empregou-se um único conversor indutivo, o limite superior ($0.20 \% VF$), indicado no segundo quadro, é o mesmo do conversor. O limite inferior foi admitido como $0.00 \% VF$, devido às possibilidades de linearização eletrônica existentes. Assim, podem ser obtidos valores semelhantes de não-linearidade elétrica, tanto utilizando conversores extensométricos quanto indutivos, sendo indistinguível a sua influência. Mas a influência da forma é notável quando se usam conversores extensométricos, pois a não-linearidade elétrica depende da posição deles e do campo de deformação de cada elemento elástico. Pelos resultados apresentados, os elementos viga dão os menores valores de não-linearidade elétrica, empregando conversores extensométricos.

Portanto, se o critério de projeto for a não-linearidade (mecânica + elétrica), conclui-se, pelos resultados obtidos na análise do PEETE, que vigas são os melhores elementos elásticos para transdutores de força extensométricos. Semelhantemente, recomenda-se usar elementos elásticos tipo placa circular em

transdutores de força indutivos.

A comparação da não-linearidade obtida no PEETE com a obtida dos transdutores existentes (figura 7.13), ficou prejudicada pelo

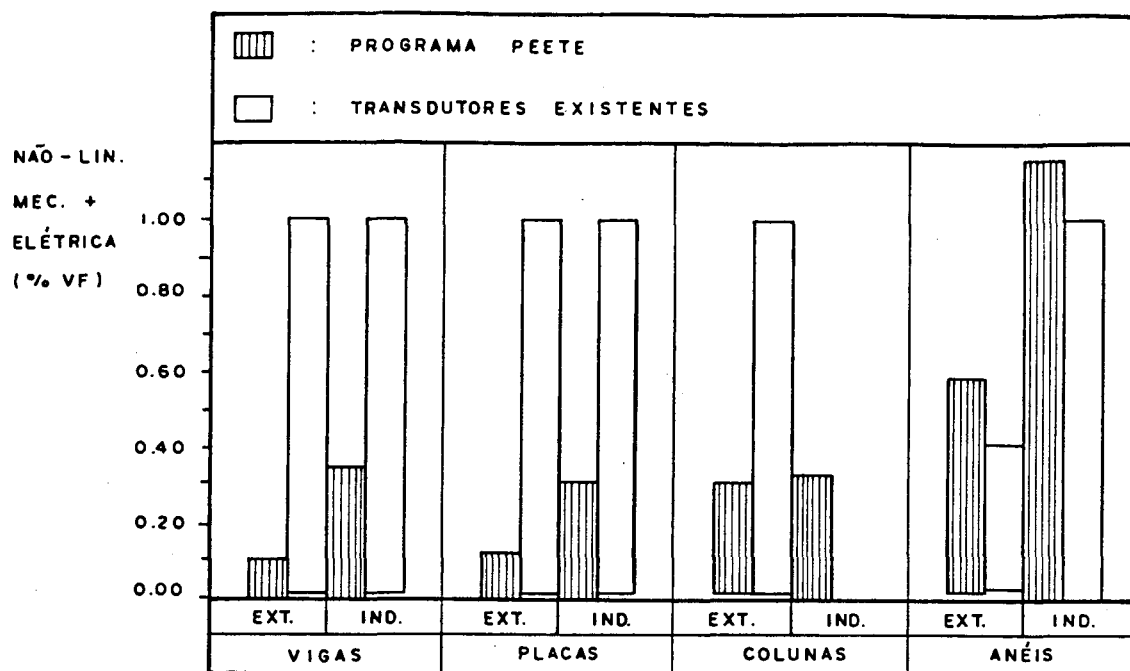


Fig. 7.13 - Comparação dos valores da não-linearidade para VF, obtidos no PEETE, com os valores disponíveis da não-linearidade de transdutores existentes.

número relativamente pequeno de valores confiáveis, encontrados para essa característica, e principalmente pela dificuldade em saber qual a sua definição considerada, nas diferentes fontes de informações dos transdutores existentes.

7.2.6 Frequência natural e máxima capacidade de canal

Os limites das frequências naturais, com carga e livre de carga, são resumidos nos quadros que seguem, em função das formas básicas de elementos elásticos e dos princípios de conversão extensométrico e indutivo.

Princípio de conversão	Frequência natural para VF (Hz)			
	vigas	placas	colunas	anéis
Extensométrico	21	30	29	22
	497	195	583	294
Indutivo	15	21	23	18
	405	160	320	225

Princípio de conversão	Frequência natural livre de carga (kHz)			
	vigas	placas	colunas	anéis
Extensométrico	0.024	2.29	7.08	0.68
	121	46.9	282	19.8
Indutivo	0.015	0.084	7.08	0.030
	8.94	14.9	56.3	8.10

Nota-se que os limites superiores das frequências naturais são maiores, quando se usa conversor extensométrico. Esse resultados são coerentes com os menores limites superiores de deslocamento, anteriormente mostrados para o mesmo tipo de conversor.

Quanto à forma, os elementos elásticos tipo coluna atingem os maiores valores de frequência natural. Observa-se que vigas são elementos alternativos para obter-se valores relativamente elevados das frequências naturais.

Na figura 7.14 estão representados os limites de frequência natural livre de carga, obtidos na análise, e os limites disponíveis de frequência natural de transdutores existentes. Comparando-os, percebe-se que existem faixas próximas dos limites superiores do PEETE, não utilizadas pelos fabricantes, para todos elementos elásticos básicos. Além disso, com exceção de colunas, quase todos valores de frequência natural livre de carga de transdutores existentes estão dentro das faixas calculadas com o

programa.

A frequência natural livre de carga foi utilizada no cálculo

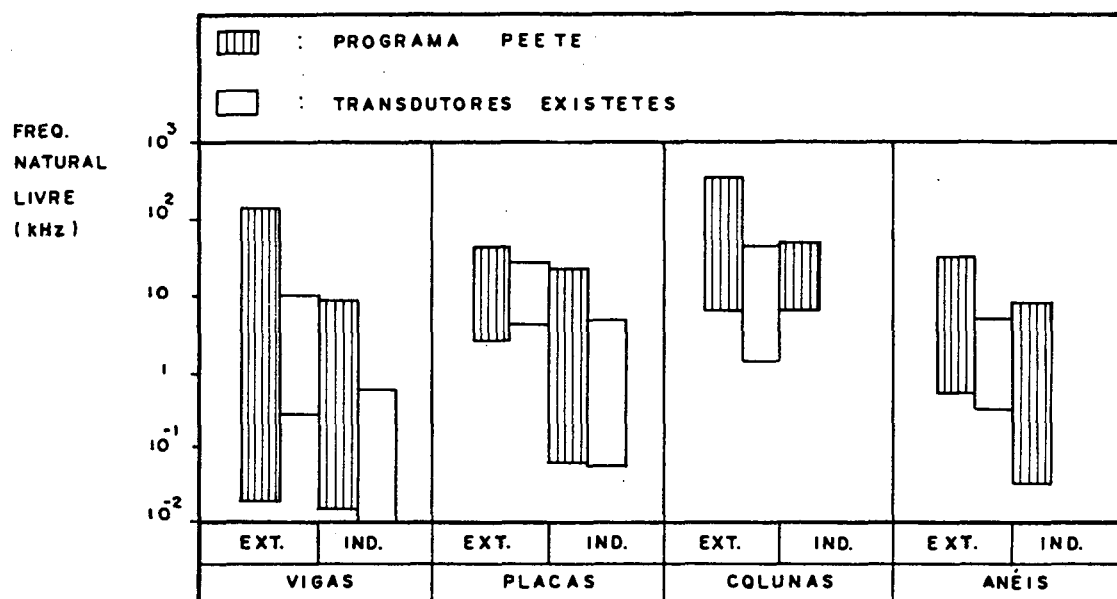


Fig. 7.14 - Comparação dos valores da frequência natural livre de carga, obtida no PEETE, com os valores disponíveis de frequência natural de transdutores existentes.

da máxima capacidade de canal, cujos limites obtidos na análise são representados na figura 7.15. Os maiores valores destes limites ocorreram para elementos tipo coluna e conversores extensométricos.

A máxima capacidade de canal não foi encontrada nas especificações de transdutores existentes e, do mesmo modo que a quantidade de informação, é útil na especificação de conversores A/D.

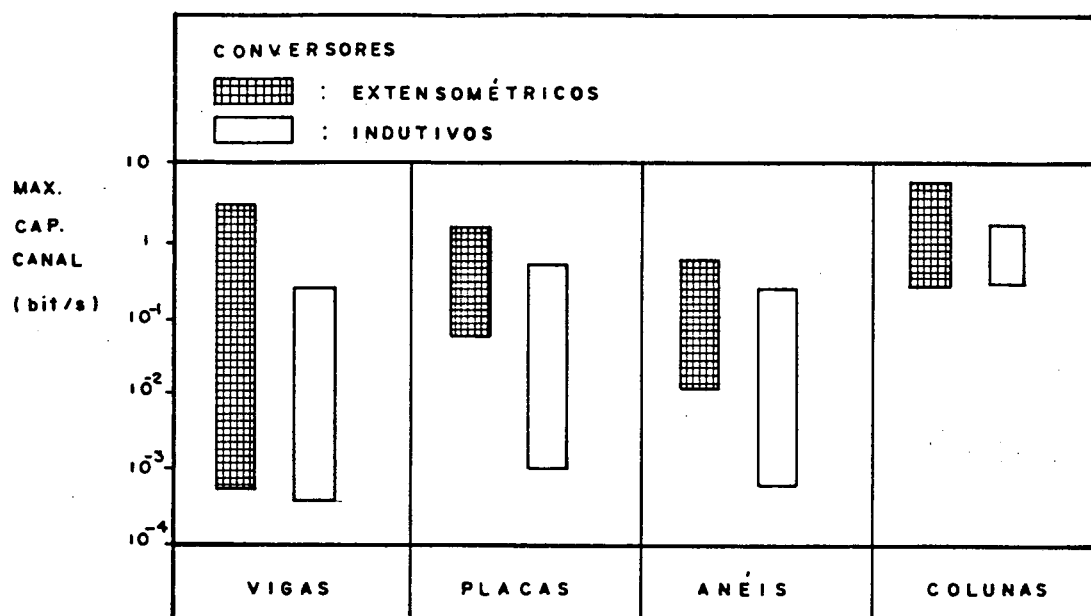


Fig. 7.15 - Limites da máxima capacidade de canal obtidos na análise da potencialidade do PEETE.

7.2.7 Resumo

O programa PEETE foi usado para gerar um conjunto de projetos de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial, segundo restrições e critérios estabelecidos. Os resultados desses projetos foram submetidos a uma análise, obtendo-se limites práticos e recomendações para um grupo de 11 características importantes, que dão condições de escolher apropriadamente os elementos elásticos, em futuros projetos, empregando conversores extensométricos ou indutivos.

Os limites obtidos na análise foram comparados com características disponíveis de transdutores existentes, a maioria do mercado. Com eles comprovou-se que existem gamas de características como faixa de medição e frequência natural, não aproveitadas pelos fabricantes. Porém, mais importante ainda é o

fato de que se constatou a capacidade do PEETE de abranger projetos existentes, possibilitada pelas suas variadas soluções, devido à sistemática implementada.

A análise revelou que, em geral, elementos elásticos tipos viga e coluna são suficientes para atender às exigências de projeto de transdutores de força, envolvendo as características examinadas e usando os conversores extensométricos e indutivos. Para exigências específicas, relacionadas com volume e tamanho, foram construídas curvas médias de escolha do elemento elástico básico, podendo ser recomendados também elementos tipo placa circular ou anel.

Os dois tipos de conversores elétricos, associados às formas de elementos elásticos, mostraram vantagens relativas especificamente às características examinadas. Assim, por exemplo, os indutivos têm a vantagem de dar ampla faixa de medição, atingindo os seus menores limites inferiores, e os extensométricos têm a vantagem de permitirem obter os menores tamanhos de elementos elásticos.

Alguns resultados da análise como vantagens de usar vigas e colunas, conversores indutivos para cargas baixas, poderiam ser obtidos por outros meios (pesquisa bibliográfica, pesquisa entre fabricantes).

O uso do programa implementado constitui-se numa alternativa simples, rápida, de amplos recursos e que possibilitou novas informações no assunto.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho mostraram-se as possibilidades de desenvolvimento de um sistema computacional de nível médio, baseado em formulação analítica aproximada, para o projeto rápido, interativo e com otimização simples de elementos elásticos de transdutores de força, pressão, torque, aceleração e deformação, que pode ser usado em microcomputadores.

A sistematização empregada resultou de estudos relativos às técnicas de projeto auxiliado por computador, aos princípios de construção e metodologia de projeto desses transdutores.

Com a sistemática estabelecida, implementou-se um programa em linguagem PASCAL, denominado PEETE, com alto grau de auto-explicatividade, que permite realizar uma análise da necessidade de projeto e fornece um projeto preliminar completo de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial.

Para tal projeto preliminar, o programa contém 36 variações das formas básicas de elementos elásticos classificados como vigas, placas circulares, colunas e anéis, e são usados os conversores extensométricos e indutivos. As fórmulas analíticas aproximadas, deduzidas para obter as características consideradas, empregando tais elementos elásticos e conversores, foram validadas utilizando resultados experimentais e também os oriundos da aplicação do método dos elementos finitos.

Com as variações de formas de elementos elásticos e os dois princípios de conversão elétrica usados, formaram-se 49 combinações forma-princípio. Para cada combinação, realizaram-se projetos que foram analisados segundo restrições e critérios

estabelecidos. Em tal análise, propunha-se determinar as limitações do programa, avaliar características de transdutores de força de mercado e obter recomendações das formas de elementos elásticos para projeto.

Assim, são destacadas as conclusões que seguem.

8.1 RELACIONADAS À SISTEMÁTICA, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE PROJETOS OBTIDOS COM O PROGRAMA IMPLEMENTADO

1) A sistemática estabelecida foi empregada no programa PEETE, proporcionando as seguintes vantagens:

- Os resultados que se obtêm (características de transdutores, forma e material do elemento elástico, posição e especificação dos conversores elétricos) são básicos para a construção de protótipos;
- Através de um exemplo, mostrou-se que o programa dá projetos preliminares otimizados de elementos elásticos, para transdutores de força, com extrema rapidez, ao comparar às soluções manuais;
- Criou-se um programa de baixo custo que, além de ser utilizado em projetos preliminares de novos transdutores, pode ser usado na avaliação de características de transdutores de força uniaxial existentes.

2) Quanto à formulação desenvolvida para elementos elásticos de transdutores de força uniaxial, a validação revelou que:

- Em geral, todas as fórmulas deduzidas servem como uma primeira aproximação para projeto preliminar;
- Na condição de erro de avaliação do sinal de saída analítico menor do que 10%, em relação ao experimental, a formulação das placas circulares (dentro dos limites de validade), colunas e

vigas, apresentou erros menores do que 10% e, portanto, dá uma boa aproximação para projeto preliminar;

- Erros de avaliação do sinal de saída podem ser reduzidos a valores inferiores a 10%, corrigindo a formulação analítica aproximada com o uso do método dos elementos finitos, para cada família de elementos elásticos de mesma forma.

3) A análise dos resultados de projetos, obtidos com o PEETE, mostrou que:

- O programa PEETE implementado tem amplos recursos, pois comprovou-se sua capacidade de obter características como faixa de medição e frequência natural, que abrangem as similares encontradas em transdutores de força uniaxial de mercado. Com isso surge uma razão para expandi-lo aos projetos de elementos elásticos das outras grandezas de medição;
- Todos resultados da análise podem servir como referência detalhada, para projetos de elementos elásticos de transdutores de força que usam os princípios extensométrico ou indutivo;
- Em geral, elementos elásticos tipos viga e coluna são suficientes para atender às exigências de projeto de transdutores de força, envolvendo as características examinadas e usando os conversores extensométricos e indutivos;
- As curvas médias do comportamento de volume e altura/diâmetro dos elementos elásticos básicos, em função dos valores finais das faixas de medição, podem ser usadas como ábacos para a escolha do elemento apropriado, quando o critério de projeto envolve tamanho e volume;
- Os dois tipos de conversores elétricos usados têm vantagens relativas especificamente às características examinadas, como são os casos de indutivos para obter faixa de medição mais ampla, ou

de extensômetros resistivos para menores tamanhos.

8.2 RELACIONADAS À CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

No campo de projeto de transdutores com elemento elástico, as contribuições do trabalho são:

1) Uma classificação de características metroológicas e construtivas, obtidas através de um levantamento detalhado das características de transdutores existentes de força, pressão, torque, aceleração e deformação, relacionando-as com as formas de elementos elásticos e os tipos de conversores elétricos mais usados. As informações resultantes foram empregadas parcialmente para a implementação do projeto preliminar de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial, no PEETE. Assim, ainda estão disponíveis informações para futuras expansões deste programa ao projeto dos outros transdutores eletro-mecânicos considerados.

2) Uma sistemática especializada para o projeto de elementos elásticos de transdutores eletro-mecânicos, que reúne experiência acumulada, teoria e técnicas em quatro áreas do conhecimento de engenharia: metrologia, mecânica dos sólidos, metodologia de projeto e projeto auxiliado por computador. Em relação a tal conhecimento são importantes contribuições:

- O uso de características incomuns como resolução de entrada, quantidade de informação e capacidade de canal, para estabelecer critérios de projeto;
- O desenvolvimento de uma formulação analítica para o cálculo das características consideradas de transdutores de força uniaxial, notadamente a não-linearidade, em elementos elásticos uniformes e não-uniformes;

- O embasamento da sistemática em uma estrutura de processo de projeto própria para sistemas de medição;
- O uso equilibrado e interdependente das técnicas de simulação linear, simulação modular e otimização simples, no estabelecimento do grau de automatização do processo de projeto, avaliado pela interatividade.

3) O programa PEETE, implementado como exemplo da sistemática, para auxiliar o projeto de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial, constituindo-se numa nova ferramenta que, com as características consideradas, proporciona uma variedade de soluções rápidas e otimizadas, em problemas típicos e específicos de medição de força.

4) Os resultados da análise de projetos obtidos com o programa PEETE, que servem como recomendações, simplificam a escolha de elementos elásticos apropriados e possibilitam novas informações para o projeto de transdutores de força, tais como faixas de medição para cada forma de elemento elástico, resolução, quantidade de informação e capacidade de canal, curvas de comportamento de volume e de relações altura/diâmetro dos elementos elásticos. Além disso, criou-se uma nova classificação das características metrológicas e construtivas, que pode substituir aquela obtida no levantamento das características de transdutores de força existentes.

8.3 RELACIONADAS À CONTINUIDADE DO TRABALHO

- 1) Quanto à expansão do PEETE, sugerem-se:
- A inclusão de transdutores de força multiaxiais e das outras grandezas mecânicas (pressão, torque, aceleração e deformação),

- para as quais têm-se informações das características de transdutores existentes;
- A inclusão de um sistema particularmente desenvolvido, ou adaptado de um existente, para o armazenamento de dados das características dos conversores elétricos e dos materiais de elementos elásticos;
 - A adição de um editor gráfico existente para o desenho detalhado de cada elemento elástico, com saída para traçador gráfico;
 - A inclusão do projeto de outros elementos mecânicos de transdutores de força (botões de carga, rótulas, diafragmas, tubos ou caixas de proteção).

2) Quanto a outros estudos específicos sugerem-se:

- O desenvolvimento de formulações específicas para famílias de elementos elásticos de mesma forma (especialmente variações de vigas não-uniformes), a serem incluídas no PEETE, corrigidas ou obtidas por análise dimensional, através de métodos numéricos como elementos finitos;
- O estudo detalhado da não-linearidade, considerando também a distribuição de deformação específica nas superfícies dos elementos elásticos e utilizando métodos numéricos;
- O emprego de rotinas de otimização existentes, para resolver diferentes problemas específicos de projeto de elementos elásticos dos transdutores para grandezas mecânicas, através de uma formulação integrada, a ser desenvolvida e implementada em microcomputador.

ANEXO A

CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES ELETRO-MECÂNICOS EXISTENTES

A.1 Generalidades

Neste anexo, apresentam-se os resultados de um levantamento de características de transdutores existentes de força, pressão, torque, aceleração e deformação. As características são classificadas em tabelas que as relacionam com formas de elementos elásticos e princípios de conversão elétrica.

As tabelas de características, relacionadas com os princípios de conversão elétrica, são apresentadas na forma de

- Informações gerais;
- Características de desempenho estáticas e dinâmicas;
- Características da grandeza de medição e de construção mecânica;
- Características elétricas;
- Características ambientais e sua influência no desempenho do transdutor;
- Sistemas de proteção.

As tabelas de características, relacionadas com as formas de elementos elásticos, são apresentadas mostrando os princípios de conversão elétrica associados: extensométrico (E), indutivo (I), piezorresistivo (P_r), piezoelétrico (P_e), ótico (O), potenciométrico (P_o), capacitivo (C), piezorresistivo difuso (P_d), balanço eletromagnético de forças (B_e) e de torque (T).

A.2 Características dos transdutores de força

informações gerais

princípio	uso	disponibilidade	custo relativo	sentido de carga	acessorios	tipo de carga	tratamento dos sinais
extens.	geral	alta	baixo	tracao e com_ressao	poucas pecas mecanicas	estat., dinam. estacionaria e impacto	DC ou AC com frequencia portadora
indut.	pequenas cargas	media	medio	tracao e com_ressao	varias pecas mecanicas	estatica e dinamica estacionaria	AC com frequencia portadora
piezores.	transdutores pequenos	media	baixo	tracao e com_ressao	poucas pecas mecanicas	estat., dinam. estacionaria e impacto	DC ou AC com frequencia portadora
piezoelet.	dinamica pequeno espaco	baixa	alto	tracao e com_ressao	especias	dinamica estacionaria e impacto	especial com amplificador de carga el.

características estáticas e dinâmicas de desempenho

características	unidade	extensometr.	indutivo	piezores.	piezoeletr.
UF-valor final da f. de medição	N	5m...20M	0.1m...500k	10m...1M	500...1M
resolução	% UF	0...1 [0.07]	0.005...0.5 [0.02]	0.01	0...0.002 [0.0006]
sensibilidade	V/N	10... 0.0001	4...0.4	2.5... 0.042	33.7...2 (μ C/N)
incerteza de medição	% UF	0.01...2 [0.3]	0.2...3.5 [0.9]	0.2...1.5 [0.6]	1...5
nao-linearidade	% UF	0.01...1.5 [0.2]	0.2...1 [0.8]	0.2...1.5 [0.5]	1
histerese	% UF	.0001...1 [0.25]	0.1...0.5 [0.38]	0.02...0.3 [0.15]	---
nao-repetibilidade	% UF	0.001...1 [0.13]	0.01...1 [0.36]	0.05...0.5 [0.12]	0.5...1
freq.natural	KHz	0.2...50	0.01...4.5	0.02...80	13...75

obs.: entre [] estão indicados valores médios

características da grandeza de medição e de construção mecânica

características	unidade	extensometr.	indutivo	piezorres.	piezoeletr.
VF-Valor Final da f. de medição	N	5mN...20mN	0.1mN...500kN	10...1mN	500...1mN
carga est. adm.	x VF	1.2...20	1...20	1.5...9	1.1...2
carga est. falha	x VF	1.2...40	2...20	2...15	---
carga lat. adm.	x VF	0.07...4	0...1	---	---
carga din. adm.	x VF	0.7...2	...0.5	...0.7	---
deslocamento para VF	mm	0.1mm...2mm [0.3]	0.1...1 [0.6]	0.076...0.127 [0.1]	0.015
tamanho	mmXmmXmm	0 12x4 ... 0 762x1270	33x12x19 ... 75x230x275	0 6x1 ... 0 305x610	0 10x6.5... 0 120x25
massa	g	6...227k	50...13k	12...181k	3.5...1.5k

obs: entre [] estão valores médios

características elétricas

características	unidade	extensometr.	indutivo	piezorres.	piezoeletr.
alimentação	V	0.5...40 [10]	3...400	5...15	---
sinal de saída relativo	mV/V	1...5 [2]	16...90	7.5...100	---
sinal de saída	mV	1...85.5	40...1000	150...1000	10...12.5
impedância de entrada	Ω	120...4400	48...54	120...1200	---
impedância de saída	Ω	120...4000	100...100000	120...1200	110...1010

obs.: entre [] estão valores usuais

características ambientais e influencia no desempenho do transdutor

características	unidade	extensometr.	indutivo	piezorres.	piezoeletr.
temperatura de referência	°C	22...25	23	25	---
temperatura compensada	°C	-10...+75	-30...+100	-1...+54	---
temperatura de operação	°C	-54...+100	-46...+100	-40...+120	-240...+260
temperatura admissível	°C	-54...+120	-100...+260	-40...+120	---
temperatura de falha	°C	-60...+150	---	-60...+150	---
desvio do zero c/temperatura	% VF/°C	0.0001...0.25	0.05...0.5	0.0002...0.01	---
desvio sensib. c/temperatura	% /°C	0.00018...0.1	0.02...0.2	0.0004...0.22	0.006...0.25
erro devido a fluência	% VF	0.001...0.1 ...0.01...0.2	---	0.5	---

sistemas de proteção

ação	proteção usada relacionada com:		
indesejável	princípio de conversão	material	efeitos ambientais
componentes indesejáveis da força	compensação no circuito de ligação dos conversores eletrônicos	uso de diafragmas, tubos ou caixas, rotulados, botões de carga	***
poeira, umidade, fogo	indicado pelo fabricante	uso de material compatível	vedação por solda uso de vedadores de borracha
agentes químicos	indicado pelo fabricante dos conversores	uso de material de proteção compatível	uso de vedadores compatíveis
vibrações	***	***	uso de isoladores de vibração ou amortecedores (óleo silicone)
sobrecargas e choques desgaste e envelhecimento	prever limite máximo de deformação e deslocamento no conversor	uso de batentes, elementos estruturais apropriados	***
	realizar calibrações conforme recomendações do fabricante		

A.3 Características dos transdutores de pressão

informações gerais						
prin_cipio	aplicacoes	tratamento de sinais	disponibilidade	custo relativo	tipo de pressao usual	qtidade de acessorios
extens. colado	geral	DC ou AC com freq. portadora	alta	medio	abs,dif, man	baixa
extens. arame	baixas a medias pressoes	idem	baixa	medio a alto	abs,dif, man	baixa
extens. pel.fina	sensores de superficie plana	idem	media	medio a alto	abs,dif, man	baixa
piezorr. colado	alta sensibilidade	idem	media	medio	abs,dif, man	baixa
piezorr. difuso	pequeno tamanho	idem	alta	medio a alto	abs,man	baixa
indu_tivo	alta sensibil. a baixas pressoes	AC com freq. portadora	alta	medio a alto	dif,man	media
capaci_tivo	pequenas a medias pressoes	especial	alta	baixo	dif	alta
piezo_eletr.	cargas dinamicas, amplas f.med.	especial c/amplif. de carga eletrica	media	baixo a medio	man	alta
potencio metrico	baixas pressoes	DC	baixa	medio a alto	dif	baixa
otico	industriais	circuito proprio especial	baixa	medio a alto	abs,man	media

características estáticas e dinâmicas de desempenho								
prin_cipio	UF-val. f.med	fisensibil. transdt. [mV/bar]	erro maximo [%UF]	nao-line- aridade [%UF]	histe- rese [%UF]	nao-repe- tibilidade [%UF]	freq. ressonan. [Hz]	tempo de resposta [s]
extens. colado	0.005... 6900	800... 8.7E-4	15...2.0	0.04... 2.0	0.1...2.0	0.03...0.5	1...1500	0.1...1.0
extens. arame	0.1...600	2000... 0.057	25...3.0	0.1...1.0	1...1.5	...1.0	0.37...50	---
extens. pel.fina	0.04...750	5000... 0.05	0.25	0.125... 0.3	0.05... 0.15	0.05	0.5...60	---
piezorr. colado	0.1...500	5000... 0.07	25...1.5	0.1...1.0	0.01... 0.3	0.1... 0.25	0.2... 1500	---
piezorr. difuso	0.06... 2000	5560... 0.01	0.1...1.0	0.0007... 1.0	0.0001... 0.9	0.1...0.5	0.1... 1700	1...5
indu_tivo	0.0006... 600	7E5... 0.08	15...1.5	0.1...1.0	0.1...1.0	0.05...0.2	0.3... 100	0.6...5
capaci_tivo	0.001... 5000	7E6... 2.5E6	08...0.5	0.05... 2.0	0.05...1.0	0.05...0.1	2...30	0.1...15
piezo_eletr.	0.0001... 5000	8E5... 0.024	...1	0.5...1.0	0.5...1.0	---	33...600	0.1... 0.4
potencio metrico	0.025... 300	---	1...2.0	---	---	---	04...4	0.02
otico	16... 2000	---	0.10... 0.15	---	---	0.005	---	---

características da grandeza de medição e de construção mecânica					
princípio	UF-valor final da f. medição [bar]	pressão admissível [xUF]	tamanho do transdutor [mm x mm x mm]	massa do transdutor [kg]	volume da cama ra de medição [ml]
extensom. colado	0.005...6900	1.2...3.5	0 20x90... 0 42x215	0.007...6	1.7
extensom. de arame	0.01...600	1.1...200	0 19x25.4... 0 50x182	0.015...1.5	---
extensom. pel. fina	0.04...750	1.3...200	0 15.5x37.6... 107x89x145	0.07...4.54	0.95...2
piezorres. colado	0.1...500	1.2...3	0 10x32... 0 35x185	0.008...0.35	---
piezorres. difuso	0.06...2000	1.1...77	0 1.27x95... 0 60x62	0.0005...1.5	---
indutivo	0.0006...600	1.2...200	19x28x35... 0 255x455	0.1...17.4	2.2...20
capacitivo	0.001...5000	1.25...500	0 5x1.5... 153x172x282	0.001...9.5	2...5
piezo- eletrico	0.0001...5000	1.1...10	0 50x63.3	0.430	1.2...2.5
potencio- metrico	0.025...300	2	62x62x61	0.4	---
otico	16...2000	1.1...2	0 75x125... 75x170x190	0.9	---

características elétricas						
prin- cípio	alimentação [V]	signal de saída [mV]	signal de sai- da relativo [mV/V]	resist. isolamento [MΩ]	impedância de entrada [Ω]	impedância de saída [Ω]
extensom. colado	0.7...38	5...36	0.4...3.5 [2]	100...10k	120...500	117...1000
extensom. de arame	0.7...30 [10]	0.875...60	1.25...8	500	120...1000	120...350
extensom. pel. fina	10...17 [10]	20...45	2...4 [3]	100...500	350...5500	600...5k
piezorres. colado	5...50 [10]	30...450	3...30	10...100	450...1800	330...1000
piezorres. difuso	5...38	15...1000	1...50	10...500	150...5000	100...3000
indutivo	2...48	0.5...500	8...50	200	54...2500	1000
capaci- tivo	9...85	...5000	---	---	2000	10...400
piezoele- trico	---	---	2.41...207 [pC/V]	1E+8	---	1E+11
potencio- metrico	...100	---	---	---	---	---
otico	20...40	---	---	---	---	---

Obs: entre [] estão valores usuais

características ambientais e influencia no desempenho do transdutor								
prin- cípio	temp.de pensada [°C]	temp.de operacao [°C]	erro zero c/temper. [%/°C]	erro sensor c/temper. [%/°C]	erro dev. vibraoes [%UF/a]	erro zero c/pressao [%/bar]	erro sensor c/pressao [%/bar]	erro dev. fonte [%UF/U]
extens. colado	-55...150	-200... 400	1.5E-4...	1.4E-4...	0.001...	---	---	---
extens. arame	-54...121	-54...121	0.018... 0.04	0.02... 0.04	0.005... 10	---	---	0.005
extens. pel.fina	-54...121	-54...121	0.009... 0.05	0.009... 0.05	1E-4... 1.2	0.007... 0.01	0.003	---
piezorr. colado	-1...232	-160... 260	0.0035... 2E-4	0.0035... 1	5E-5... 0.02	---	---	---
piezorr. difuso	-195... 235	-195... 273	---	2E-4... 2	5E-5... 0.05	---	---	---
indutivo	-30...80	-45...220	2E-4... 0.1	2E-4... 0.15	0.02... 0.15	0.002... 0.04	0.0025... 0.01	0.01... 0.03
capaci- tivo	-53...246	-53...250	2E-4... 0.12	0.009... 0.054	1E-6... 0.05	0.003... 0.01	7E-4... 0.04	0.005
piezoele- trico	---	-150... 240	0.02	0.01... 0.03	1E-4... 0.01	---	---	---
potencio- metrico	---	-55...180	---	0.006	...1	---	---	---
otico	-18...65	-40...62	---	---	---	---	---	0.002

sistemas de protecao			
acao	protecao usada relacionada com:		
indesejavel	principio de conversao	material	efeitos ambientais
explosao do transdutor	***	atraves do coeficiente de seguranca	uso de caixas hermeticas (a prova de explosao)
poeira, umidade, fogo	indicado pelo fabricante dos conversores	uso de material compativel	construcao hermetica, uso de vedadores
agentes quimicos	indicado pelo fabricante dos conversores	diafragmas separadores fluido de enchimento materiais compatíveis	normas: BS 4589, DIN 50015, IEC 144
vibraoes	***	***	isoladores de vi- bracoes, amortecedores (oleo silicone)
sobrecargas e choques	prever limite maximo de deformacao ou de deslocamento	valvulas de seguranca	***
desgaste e envelhecimento	realizar calibracoes conforme recomendacoes do fabricante		

A.4 Características dos transdutores de torque

informações gerais

tipo de torquímetro	aplicacoes	transmissao de sinal	tratamento de sinal	qtidade de aces_sorios	disponi_bilidade	custo relativo	
rotativo	torque em eixos (motores, bombas, ventiladores, caixas de en_grenagens)	aneis de des_lizamento e escovas, transformador girante.	DC ou AC com frequencia portadora	grande	media	alto	
REACAO	esta_tico	torque (aperto) de parafusos, dinamômetros, teste de fre_nagem.	direta	DC ou AC com frequencia portadora	pequena	media	baixo
	dina_mico	aperto rapido de parafusos, mediacao de viscosidade e atrito em mancais	aneis de des_lizamento e escovas, transformador girante	DC ou AC com frequencia portadora	media	media	medio

características estáticas e dinâmicas de desempenho

princípio	tipo de torquímetro	UF-v. final da f. med. [Nm]	sensibilidade [mV/Nm]	rotação máxima [rpm]	não-linearidade [%UF]	repetibilidade [%UF]	rigidez torcional [Nm/rad]
extensom. colado	rotativo	0.07...339k	5.8E-5...715	1000...24000	0.05...1 [0.25]	0.05...0.5 [0.05]	12.6...28.2E6
	reação estática	30...2715	0.022...2	---	0.25...1 [0.25]	0.1	800...1.9E5
	reação dinâmica	0.5...50k	0.0004...100	...5000	0.1...0.25 [0.25]	0.05...0.1 [0.07]	50...13E6
piezorres. colado	rotativo	25...10k	0.01...4	2000	---	---	---
	reação estática	100...200	1	---	---	---	---

Obs: entre [] estão valores usuais

características da grandeza de medição e de construção mecânica

prin- cípio	tipo de torquímetro	UF-valor final da f. medição [Nm]	torque admissível [Nm]	tamanho [mmxmmxmm]	massa [kg]
extensom. colado	rotativo	0.07...339k	0.14...508k	Ø 38 x 16... Ø 320 x 353	0.35...430
	reação estática	30...2715	---	Ø 10 x 70... Ø 140 x 227	---
	reação dinâmica	0.5...50k	0.5...85k	Ø 10 x 70... Ø 355 x 270	---
piezorres. colado	rotativo	25...10k	50...20k	Ø 120 x 190... Ø 220 x 300	---
	reação estática	100...200	---	Ø 36 x 50... Ø 46 x 58	---

características elétricas

prin- cípio	alimentação [V]	sinal de saída [mV]	sinal de sai- da relativo [mV/V]	impedância de entrada [Ω]	impedância de saída [Ω]	balanço do zero [%UF]
extensom. colado	2.4...20 [10]	3...60 [10]	0.75...5 [2]	120...350	120...350	1...5
piezorres. colado	9...10 [10]	100...200	10...22.2	---	120...1600	2

Obs: entre [] estão valores usuais.

características ambientais e influência no desempenho do transdutor

prin- cípio	temperatura compensada [°C]	temperatura de operação [°C]	erro do zero devi- do a temperatura [%/°F/°C]	erro da sensib.de- vido a temperatura [%/°C]
extensom- colado	-18...80	-55...105	0.0011...0.03	0.0011...0.04
piezorr- colado	---	10...70	0.05	0.05

sistemas de proteção

ação	proteção usada relacionada com:		
indesejável	princípio de conversão	material	efeitos ambientais
componentes indesejáveis do torque	compensação no circui- to de ligação dos con- versores eletrônicos	uso de diafragmas, tubos ou caixas, rotu- las, botões de carga	***
poeira, umidade, fogo	indicado pelo fabricante	uso de material compatível	vedação por solda uso de vedadores de borracha
agentes químicos	indicado pelo fabricante dos conversores	uso de material de proteção compatível	uso de vedadores compatíveis
vibrações	***	***	uso de isoladores de vibração ou amortecedores
sobrecargas e choques desgaste e envelhecimento	prever limite máximo de deformação e deslo- camento no conversor	uso de batentes, elementos estruturais apropriados	***
	realizar calibrações conforme recomendações do fabricante		

informações gerais						
prin_cipio	aplicacoes	tratamento de sinais	disponibilidade	custo relativo	qtidade de com_ponentes	qtidade de aces_sorios
piezo_eletr.	choques e vibr. em geral	especial c/ amplif de c. eletrica	alta	baixo a alto	media	grande
piezorr.colado	vibr. c/ freq. baixas a altas	DC ou AC com freq. portadora	media	baixo a alto	pequena	pequena
extens.colado	vibr. c/ freq. baixas	idem	media	baixo a alto	pequena	pequena
extens.arame	vibr. c/ freq. baixas a medias	idem	media	baixo a alto	media	media
indu_tivo	vibr c/ freq. baixas a medias	AC com frequencia portadora	media	baixo a medio	media	media
balanco forca	pequeno erro e alto s. de saida	DC, excit. RF, demod. rede amortec.	baixa	medio a alto	grande	pequena
potencio metrico	aceler. baixas c/ variacao lenta	DC	baixa	baixo a medio	media	pequena
balanco torque	pequeno erro e alto s. de saida	DC, excit. RF, demod. rede amortec.	baixa	medio a alto	grande	pequena

características estáticas e dinâmicas de desempenho							
prin- cípio	No. de compo- nentes	UF-valor fi- nal f.med. [g]	sensibilidade [mV/g]	nao-line- aridade [%UF]	erro de frequencia histerese natural [%UF] [kHz]	resposta em freq. [kHz]	
piezo- eletr.	uniaxial	1...1E5	0.04...1E5	0.5...2	---	0.012... 2E-4...	
	triaxial	1000...2000	0.4...24			250 20	
piezor- resist.	uniaxial	1...1.5E5	0.001...790		0.1...		
	biaxial	5...5000	0.05...15	0.2...2	0.25	0.1...1000 1...50	
	triaxial	5...2E4	0.025...25				
extens. colado	uniaxial	1...1000	0.00125...200	1	1	0.05...8 3...5	
	triaxial	2...1000	0.00125...1.5				
extens. arame	uniaxial	0.5...500	0.04...40	0.75...	---	0.06...3.8 ---	
indu- tivo	uniaxial	1...250	0.4...210	2	0.02	0.2... 2000 ...0.2	
balanco eletrom.	uniaxial	1...100	55.6...1E5	0.02... 0.5	0.01... 0.1	---	
						...0.1	
poten- ciom.	uniaxial	0.6...25	2.27...3735	0.05	0.5	0.014 0.090 ---	
balanco torque	uniaxial	0.25...12	20...20000	0.1	0.05	0.030... ---	
	triaxial	1...6	555...25000			0.14	

características da grandeza de medição e de construção mecânica							
princípio	No. de com- ponentes	UF-v. final da f. med. estat. adm.	acel. max [g]	acel. max dinam. adm. [g]	tamanho [mmXmmXmm]	massa [g]	amorteci- mento
piezo- elétrico	uniaxial	1...1000	---	6...4000	Ø 3.6x2.40	14...500	---
	triaxial	500...2000	---	---	26x26x170	85...41	---
piezorr- sistivo	uniaxial	1...150	30...150k	2...500k	3.5x3.5x4	0.5...55	---
	biaxial	5...5000	---	25...25k	...	2.5...6	---
colado	triaxial	5...20k	10k...40k	25...50k	25x25x21	2.5...35	0.01
	uniaxial	1...1000	---	3...3000	Ø 16x15.5	6.5...900	0.7
extens. colado	triaxial	2...1000	---	30...3000	Ø 64x65	45...160	0.7
	uniaxial	0.5...500	3...1000	---	Ø 16x17 56x27x64	0.5...500	0.6...0.8
indutivo	uniaxial	1...250	---	5...375	Ø 12.6x40 25x25x30	17...50	0.6
	uniaxial	1...100	---	3...300	62.5x54x36 73x56.5x45	180...330	---
balanco eletrost.	uniaxial	0.6...25	---	100	48x48x78.5	725	0.7...2
potencio- métrico	uniaxial	0.25...12	---	20...50	101x64x80	90...180	0.3...0.8
balanco de torque	triaxial	1...6	---	2000	---	500	0.6...0.8

características elétricas						
prin- cípio	alimentação [V]	signal de saída [mV]	signal de sai- da relativo [mV/V]	resist. isolamento [MΩ]	impedância de entrada [Ω]	impedância de saída [Ω]
piezo- elétrico	---	5000...10000	---	0.1...1E7	100	---
piezorr- colado	6...15 [10]	45...750 [200]	3...75 [22.5]	1...100	350...2500	345...2500
extensom- colado	1...3	1.25...3 [1.5]	0.5...1 [0.5]	> 500	120...300	120...300
extensom- de arame	5...10 [6]	3.125... 40 [20]	1.25...4 [3.5]	---	120...600	120...600
indutivo	2...10	100...400	9.55...80 [19]	---	41	1000
balanco eletrom.	15...28	1000...10000 [5000]	---	---	---	---
potencio- métrico	27	56.7...2241	2.1...83	---	1200...1500	---
balanco torque	15...32 [22]	1000...5000	8.4...500 [333]	---	---	---

Obs: entre [] estão valores usuais

características ambientais e influencia no desempenho do transdutor						
prin- cípio	temperatura referencia [°C]	temperatura de operacao [°C]	temperatura admissivel [°C]	erro zero c/ temperatura [1/UF/°C]	erro sens.c/ temperatura [1/°C]	erro devido acel.transv. [1/UF/g]
piezo- eletrico	21...22	-270...760 [-55...180]	-100...500	---	5E-4...40	3E-5...5
piezorr. colado	---	-40...100 [0...80]	-50...120	0.02...0.02	0.05...0.08	6E-4...2
extens. colado	20...25	-10...60	60	0.006...0.3	0.006	6E-4...0.21
extens. arame	20...25	-40...80	---	---	---	0.03...0.21
indutivo	20	-20...80 [-10...60]	-20...80	0.025...0.1	0.02...0.04	---
balanco eletrom.	---	-55...90	-55...125	0.01	0.005...0.02	---
potencio metrico	20	-30...70	-50...100	0.04	0.04	---
balanco torque	20	-30...85	-50...100	0.005	0.005	0.008...0.4

Obs: entre [] estao valores usuais

sistemas de protecao			
acao	protecao usada relacionada com:		
indesejavel	princípio de conversao	material	efeitos ambientais
componentes indesejaveis da aceler.	compensacao no circui- to de ligacao dos versores eletricos	aumentar a rigidez na direcao da componente, uso de tubos ou caixas	***
poeira, umidade, fogo	indicado pelo fabricante	uso de material compativel	vedacao por solda uso de vedadores de borracha
agentes quimicos	indicado pelo fabricante dos conversores	uso de material de protecao compativel	uso de vedadores compativeis
vibracoes	***	***	uso de isoladores de vibracao ou amortecedores
sobrecargas e choques	prever limite maximo de deformacao e deslo- camento no conversor	uso de batentes, elementos estruturais apropriados	***
desgaste e envelhecimento	realizar calibracoes conforme recomendacoes do fabricante		

A.6 Características dos transdutores de deformação

informações gerais						
prin_cipio	aplicacoes	acessorios	disponi_bilidade	tipo de carga	sentido de carga	tratamento dos sinais
extens_colado	deformacoes medias a altas	varias pecas mecanicas	alta	estatica ou dinamica	tracao e compressao	DC ou AC com frequencia portadora
indutivo	deformacoes pequenas a altas	varias pecas mecanicas	media	estatica ou semi_estatica	tracao e compressao	AC com frequencia portadora

características estáticas e dinâmicas de desempenho						
prin_cipio	tipo de deformacao	UF-valor fi_nal da f.med	sensibi_lidade	nao-linea_ridade [%UF]	frequencia admissivel [Hz]	rigidez [gf/mm]
extensom_colado	especifica	500...500000 [με]	4E-5...83E-4 [μV/με]	0.05...0.30	50...300	23
	direta	2.5...16 [mm]	1.87...60 [μV/mm]			
indutivo	especifica	100...400000 [με]	2...5E-4 [μV/με]	1.0	---	300 [mgf/mm]
	direta	10 [mm]	20 [μV/mm]			

características da grandeza de medição e de construção mecânica

prin- cípio	tipo de deformação	UF-valor fi- nal f.med. [mm]	base de medição [mm]	máxima força de operação [gf]	tamanho [mmxmmxmm]	massa [kg]
extensom. colado	específica	500...500000 [N]	8, 10, 25, 50, 60, 86, 100 150, 200	15...1200	10x26x60... 245x36x11	0.01...0.5
	direta	2.5...16 [mm]				
indutivo	específica	100...400000 [N]	25, 50 75, 100	---	22x32x100	1.2
	direta	10 [mm]	100			

características elétricas

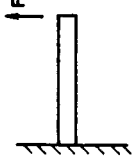
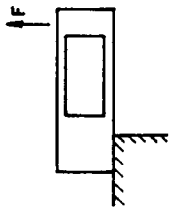
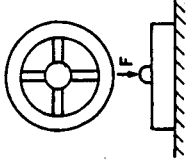
princípio	alimentação [V]	saída de sinal [mV]	saída de sinal relativo [mV/V]	impedância de entrada [Ω]	impedância de saída [Ω]
extensom. colado	1...12	1...30	1...3	120...600	120
indutivo	2...5	200	80	---	---

características ambientais e influência no desempenho do transdutor

princípio	temperatura compensada [°C]	temperatura admissível [°C]	temperatura de operação [°C]	erro no zero c/ temperatura [μF/°C]	erro na sensib/ temperatura [%/°C]
extensom colado	-10...60	-265...595	-265...595	---	---
indutivo	---	-40...80	-40...80	0.001	0.002

sistemas de proteção			
ação indesejável	proteção usada relacionada com:		
	princípio de conversão	material	efeitos ambientais
componentes indesejáveis da deformação	compensação no circuito de ligação dos conversores eletrônicos	uso de elementos mecânicos adequados	***
poeira, umidade, fogo	indicado pelo fabricante	uso de material de proteção compatível	uso de vedadores apropriados
agentes químicos	indicado pelo fabricante dos conversores	uso de material de proteção compatível	uso de vedadores compatíveis
vibrações	***	***	uso de isoladores de vibração
sobrecargas e choques	prever limite máximo de deformação e deslocamento no conversor	acessórios estruturais apropriados	***
desgaste e envelhecimento	realizar calibrações conforme recomendações do fabricante		

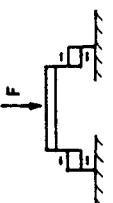
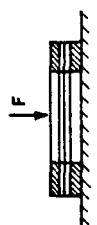
A.7 Características relacionadas às formas de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial



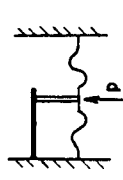
FORMA DE ELEMENTO ELÁSTICO	CONVERSOR	VALOR FINAL DE CARGA VF (N)	SENSIBILIDADE (mV/N)	ERRO MÁXIMO (% VF)	NÃO-LINEARIDADE (% VF)	MASSA (kg)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NATURAL (kHz)	TAMANHO (BASE x ALT.) (mm x mm x mm)	ALT./DIÂM.	VOLUME (mm ³)
VIGAS SIMPLES 	E	0.005 ... 10 ³	0.20 ... 10 ⁴	0.08 ... (0.2) 1	0.08 ... (0.1) 1	0.05 ... 6.8	0.22 ... (0.4) 2	0.210 ... 0.700	Ø17 x 117 ... 162 x 50 x 35	6.88 ... 0.22	2.7 x 10 ⁴ ... 2.8 x 10 ³
	I	0.0001 ... 20	21 ... 420	0.2 ... (1) 3.5	— ... —	— ... 0.07	— ... (1) 1	— ... 0.020	— ... 10.2 x 15 x 0.5	— ... 0.05	— ... 7.65
	P _r	0.01 ... 500	0.3 ... 2.5 x 10 ³	0.2 ... (0.8) 1.5	— ... 0.5	0.10 ... 0.34	— ... —	0.020 ... 6.000	25 x 25 x 37.5 ... Ø17 x 60	1.5 ... 3.53	2.3 x 10 ⁴ ... 1.4 x 10 ⁴
VIGAS DUPLAS 	E	10 ... 5 x 10 ⁴	4 x 10 ⁻⁴ ... 1.25	0.02 ... (0.2) 1	0.02 ... (0.1) 0.3	0.150 ... 19	0.1 ... (0.4) 2	0.200 ... 1.360	60 x 20 x 26 ... 320 x 120 x 90	0.43 ... 0.28	3.1 x 10 ⁴ ... 3.5 x 10 ⁶
	I	0.02 ... 500	7 ... 2400	0.2 ... (1) 3.5	— ... —	0.050 ... 13	— ... —	0.010 ... 0.680	33 x 12 x 19 ... 102 x 19 x 32	0.58 ... 0.31	7.5 x 10 ³ ... 6.2 x 10 ⁴
	P _r	25 ... 120	4 x 10 ⁻⁵ ... 2 x 10 ⁻⁴	0.2 ... (0.8) 1.5	— ... 0.5	— ... 0.200	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —
VIGAS MULTIPLAS 	E	50 ... 2 x 10 ⁶	18 x 10 ⁻⁶ ... 0.18	0.02 ... (0.2) 1	0.02 ... (0.1) 0.5	0.150 ... 60.0	0.001 ... 0.550	0.500 ... 10.0	650 x 25 ... Ø300 x 200	0.50 ... 0.67	4.9 x 10 ⁴ ... 1.4 x 10 ⁷
	P _r	50 ... 2 x 10 ⁵	1.5 x 10 ⁻³ ... 3.0	0.2 ... (0.8) 1.5	— ... 0.5	0.680 ... 6.80	— ... —	2.300 ... 6.700	33 x 38 ... Ø120 x 40	1.15 ... 0.33	3.2 x 10 ⁴ ... 4.5 x 10 ³

OBS: ENTRE () ESTÃO VALORES MÉDIOS.


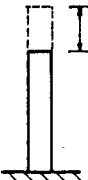
FORMA DE ELEMENTO ELÁSTICO	CONVERSOR	VALOR FINAL DE CARGA VF (N)	SENSIBILIDADE (mV/N)	ERRO MÁXIMO (% VF)	NÃO-LINEARIDADE (% VF)	MASSA (kg)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NATURAL (kHz)	TAMANHO (BASE x ALT.) (mm x mm)	ALT./DIÂM.	VOLUME (mm ³)
PLACAS CIRCULARES	E	5	24×10^{-6}	0.09	0.025	0.006	0.06	4.00	Ø12 x 4	0.33	450
		...	...	...(0.5)	...(0.4)	...	...(0.08)	...	...	...	...
		10^6	0.3	1.4	1.0	4.5	0.10	19.3	Ø210 x 430	2.05	1.5×10^7
I	I	0.01	4×10^{-4}	0.2	0.2	0.200	0.10	0.060	90 x 32 x 60	0.67	1.7×10^5
		...	...	...(0.7)	...(0.7)	...	...(0.40)	...	...	...	...
		5×10^5	800	1.0	1.0	10.0	1.00	4.50	Ø160 x 180	1.13	3.6×10^6
P _r	P _r	1	6.3×10^{-4}	0.45	0.3	0.010	—	4.000	Ø6 x 1	0.17	28
		...	...	...(0.8)	...(0.6)	...	—	...	...	...	...
		5×10^4	3×10^4	1.5	1.0	0.950	0.08	80.0	Ø32 x 6.5	0.20	5.2×10^3
E	E	50	2×10^{-4}	0.03	0.02	0.07	0.08	0.200	Ø32 x 64	2.00	5.1×10^4
		...	...	...(0.3)	...(0.2)	...	...(0.15)	...	...	...	...
		5×10^4	0.720	0.5	0.35	5	0.300	3.800	Ø110 x 126	1.15	1.2×10^6
I	I	5	—	—	—	—	—	—	Ø40 x 60	1.50	7.5×10^4
		10^5	—	—	—	—	—	—	...	...	...
		...	...	...	...	...	...	...	75 x 230 x 275	3.67	4.7×10^6
P _r	P _r	50	2×10^{-4}	0.25	0.2	0.120	—	2.60	Ø32 x 35	1.09	804
		...	...	...(0.5)	...(0.3)	...	...	...	...	...	...
		5×10^4	4	0.5	0.35	4.50	0.075	3.40	Ø89 x 151	1.70	9.4×10^5
E	E	1000	10^{-7}	0.03	0.01	0.010	0.01	1.050	Ø13 x 102	7.85	1.4×10^4
		...	...	...(0.5)	...(0.3)	...	...(0.25)	...	...	...	...
		2×10^7	7.2×10^{-3}	2.3	1	2.30	1.2	50.0	Ø762 x 1270	1.67	5.8×10^8
I	I	5×10^4	2.1×10^{-3}	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—
		2×10^5	8.4×10^{-3}	—	—	4	0.12	—	Ø76 x 29.8	3.92	1.4×10^6
P _r	P _r	20	2×10^{-4}	0.5	0.35	0.5	0.1	1.050	Ø9 x 26	2.89	1.7×10^3
		...	...	...(0.7)	...(0.6)	...	...(0.11)	...	...	...	...
		10^6	0.03	1.1	0.9	1.60	0.13	2.400	Ø305 x 610	2.00	4.5×10^7

OBS: ENTRE () ESTÃO VALORES MÉDIOS.

FORMA DE ELEMENTO ELÁSTICO	CONVERSOR	VALOR FINAL DE CARGA VF (N)	SENSIBIL I DADE (mV/N)	ERRO MÁXIMO (% VF)	NÃO-LINEA RIDADE (% VF)	MASSA (kg)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NATURAL (kHz)	TAMANHO (BASE x ALT.) (mm x mm x mm)	ALT./DIÂM.	VOLUME (mm ³)
ANEL TORÇÃO 	E	1500	18×10^{-6}	0.02	0.02	4	0.2	—	Ø130 x 56	0.43	7.4×10^5
		—
		5×10^6	57×10^{-3}	0.03	0.03	170	0.5	—	Ø360 x 335	0.93	3.4×10^7
ANÉIS DE QUARTZO 	Pe	500	2 pc/N	1	—	0.0035	—	13	Ø10 x 6.5	0.65	510
	
		10^6	34 pc/N	5	1	1.5	0.015	75	Ø120 x 25	0.21	2.8×10^5

FORMA DE ELEMENTO ELÁSTICO	CONVERSOR	VF_VALOR FLUIDO NAL F. DE ME DICAÇÃO (bar)	SENSIBILIDADE (mV/bar)	ERRO MÁXIMO (% VF)	NÃO-LINEARIDADE (% VF)	MASSA DO TRANSDUTOR (kg)	FREQUÊNCIA NATURAL (kHz)	VOLUME CÂMARA DE MEDIÇÃO (ml)	VARIÁVEL DE CÂMARA (ml)	TAMANHO (BASE x ALT.) mm x mm x mm	ALT./DIÂM.	VOLUME DO TRANSDUTOR (mm ³)
DIAFRAGMAS CORRUGADOS 	E	0.5 ... 3.5	1.7 ... 120	— ... 1.5	— ... 1	— ... 0.34	— ... 4.3	— ... —	— ... —	— ... Ø 42 x 92	— ... 2.19	— ... 1.3 x 10 ⁵
	I	0.05 ... 2.5	— ... —	0.15 ... 1.5	0.2 ... 0.5	3.5 ... 17.4	— ... —	— ... —	— ... —	114 x 225 x 135 ... Ø 255 x 455	0.60 ... 1.78	3.5 x 10 ⁶ ... 3.0 x 10 ⁷
	O	0.1 ... 1.4	— ... —	— ... —	— ... —	— ... 0.7	— ... —	— ... —	— ... 0.65	Ø 75 x 125 ... 75 x 170 x 190	1.12 ... 1.67	5.5 x 10 ⁵ ... 2.4 x 10 ⁶
	I	0.01 ... 2.5	— ... —	— ... 0.15	— ... —	2.2 ... 5.5	— ... —	— ... —	— ... —	175 x 203 x 85 ... 245 x 240 x 110	0.41 ... 0.45	3.0 x 10 ⁶ ... 6.5 x 10 ⁶
TUBOS BOURDON 	O	1.6 ... 2000	— ... —	— ... 0.15	— ... —	— ... 0.9	— ... —	— ... —	— ... —	Ø 75 x 125 ... 75 x 170 x 190	1.12 ... 1.67	5.5 x 10 ⁵ ... 2.4 x 10 ⁶
	E	0.01 ... 0.25	163 ... 2000	— ... 1.5	— ... 1	0.3 ... 0.6	0.4 ... 1.2	— ... —	— ... —	Ø 42 x 87 ... Ø 60 x 125	2.07 ... 2.08	1.2 x 10 ⁵ ... 3.5 x 10 ⁵
	I	0.01 ... 1.6	— ... —	— ... 1	— ... 0.5	4 ... 5.5	— ... —	— ... —	— ... —	245 x 240 x 110 ... 110 x 320 x 400	0.45 ... 1.25	6.5 x 10 ⁶ ... 1.4 x 10 ⁷
	P ₀	0.1 ... 300	— ... —	1 ... 2	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —	— ... —
VIGAS e DIAFRAGMAS 	E	0.04 ... 700	0.05 ... 267	0.2 ... 0.5	0.1 ... 0.5	0.2 ... 4.5	0.5 ... 35	— ... —	— ... —	Ø 16 x 38 ... 107 x 89 x 145	2.38 ... 1.36	7.6 x 10 ⁵ ... 1.4 x 10 ⁶
	P _e	— ... 1	100 ... 200	— ... —	— ... 1	— ... 0.43	— ... 350	— ... —	— ... —	— ... Ø 50 x 63	— ... 1.26	— ... 1.2 x 10 ⁵

A.11 Características relacionadas às formas de elementos elásticos de transdutores de deformação

FORMA DE ELEMENTO ELÁSTICO	CONVERSOR	VF-VALOR F ₁ DE M _E DICAÇÃO (μm/m)	VF-VALOR F ₁ DE M _E DICAÇÃO (mm)	SENSIBILIDADE (mV/μm/m)	SENSIBILIDADE (mV/mm)	NÃO LINEARIDADE (%VF)	MASSA DO TRANSDUTOR (kg)	RIGIDEZ (N/m)	FREQUÊNCIA ADMISSÍVEL (Hz)	TAMANHO (BASE ALT.) (mmxmmxmm)	ALT./DIÂM.	VOLUME DO TRANSDUTOR (mm ³)
VIGAS 	E	20000	0.5	4×10^{-3}	1.9	0.05	0.002	0.23	20	10x26x60	2.31	1.6×10^4
	
		500000	16	150×10^{-3}	60	0.3	0.080	—	300	—	—	—
	I	100	—	50×10^{-3}	20	—	—	—	—	—	—	—
LÂMINAS TRAÇÃO/COMPRESSÃO 	E	400000	10	2	—	1	1.2	0.003	—	122x32x100	0.82	3.9×10^5
		500	—	—	—	—	0.060	1.8	—	75x32x31	0.04	74×10^4
	
		20000	—	830×10^{-3}	—	—	0.500	6.0	—	245x36x11	0.41	9.7×10^4

ANEXO B

**FORMULAÇÃO DETALHADA PARA ELEMENTOS ELÁSTICOS DE
TRANSDUTORES DE FORÇA**

A formulação desenvolvida, para todas variações consideradas de viga, placa circular, coluna e anel, é apresentada em itens separados, de acordo com cada uma dessas formas básicas. Para as deduções, as fórmulas usadas da bibliografia são referenciadas no texto. As definições e fórmulas comuns aos elementos elásticos estão indicadas na figura B.1.

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Cargas	W, F	N	W : força sobre o el. elástico F : força sobre o modelo básico
fator divisor de carga	β	-	$\beta = W/F$ $\beta=1$, para elementos em série $\beta=n_e$, para n_e el. em paralelo
Deslocamentos	v, v_b	mm	v : desl. clássico do el. elástico v_b : desl. clás. do modelo básico
Fator divisor de deslocamento	α	-	$\alpha = v/v_b$ $\alpha=1$, para elementos em paralelo $\alpha=n_e$, para n_e elementos em série
Deslocamento real el. elástico	v_r	mm	$v_r = v(1+\eta_m)$ η_m : não-linearidade mecânica
Módulos de elasticidade	E, G	GPa	E : normal G : cisalhante
Coef. Poisson	ν	-	$G = E/(2(1+\nu))$
Massa específica	ρ	kg/m ³	uso no cálculo da massa do elemento elástico
Deformação aparente (ponte de Wheatstone)	$\bar{\epsilon}$	$\mu\text{m/m}$	$\bar{\epsilon} \cong \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = f_p(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ $\epsilon_1 \cong \epsilon_3$; $\epsilon_2 \cong \epsilon_4$
Fator de ponte	f_p	-	$f_p=1$, meia ponte; $f_p=2$, p. compl.

Fig. B.1 - Definições e fórmulas comuns aos elementos elásticos de transdutores de força.

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Frequência natural com carga	f_n	Hz	$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{W/g + m_o + m_t/3}}$
Frequência natural sem carga	f_{n_o}	Hz	$f_{n_o} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m_o + m_t/3}}$
Massa oscilante não deformável	m_o	kg	$m_o = \rho V_o$
Massa oscilante deformável	m_t	kg	$m_t = \rho V_t$
Const. de mola	C	N/m	Indicado nas próximas figuras
Volume oscil. não deformável	V_o	m ³	Indicado nas próximas figuras
Volume oscil. deformável	V_t	m ³	Indicado nas próximas figuras

Fig. B.1 - Definições e fórmulas comuns aos elementos elásticos de transdutores de força (continuação).

B.1 Elementos elásticos tipo viga

A formulação das variações de elementos elásticos tipo viga foi desenvolvida em função de um modelo básico. Esse modelo é representado por uma viga em balanço, não uniforme e de secção transversal retangular, em cuja extremidade livre aplica-se uma força transversal F e um momento $M_d = Fd$. A força e o momento causam flexão no mesmo plano vertical que contém o eixo neutro da viga e d é a distância da extremidade livre dela ao ponto afastado de aplicação de F , no seu prolongamento. Sob carregamento, o ângulo de rotação da extremidade livre também pode assumir valor nulo e ela pode ser forçada a deslocar-se segundo uma linha vertical.

esse modelo básico foi deduzido em relação a uma viga uniforme de secção transversal retangular que serve de referência e a idéia central foi determinar as características calculadas, sempre em

termos do modelo básico, para todos elementos elásticos tipo viga.

Na figura B.2 mostra-se a formulação deduzida para o modelo básico e na figura B.3 as propriedades geométricas associadas a cada elemento elástico considerado, bem como a validade da formulação relativa à geometria.

Para a validade das expressões usadas no cálculo do deslocamento real do elemento elástico, dois problemas são considerados :

- 1^o) Deslocamento de viga em balanço, com extremidade livre;
- 2^o) deslocamento de viga em balanço, com extremidade forçada a deslocar-se segundo uma linha vertical.

A solução exata do primeiro problema pode ser encontrada em [47] , tendo o trabalho de resolver numericamente as integrais elípticas envolvidas. Observa-se que os maiores valores v_r/L (v_r é o deslocamento real e L é o comprimento da viga), obtidos para os elementos elásticos considerados, estão abaixo de 0.2, limite até onde aproximadamente o deslocamento linear clássico pode ser usado em problemas comuns de engenharia estrutural. Considerando isso e a fim de evitar as integrais elípticas, adotou-se uma solução aproximada para determinar o deslocamento real, ou particularmente a não-linearidade mecânica η_m .

A aproximação consistiu em substituir o braço de momento inicial L pelo braço variável $L-\Delta L$, onde ΔL é o encurtamento, ou deslocamento horizontal, que varia com a carga aplicada e é determinado por [77]

$$\Delta L = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 dx \quad (B.1)$$

Foi fácil deduzir que a não-linearidade η_m é determinada então por $\eta_m = -\Delta L/L$. Assim, para rotação da extremidade livre, com

qualquer valor, zero ou diferente de zero, obteve-se

$$\eta_m = -0.6 \left(\frac{v}{L} \right)^2 \quad (\text{B.2})$$

Essa expressão forneceu valores de deslocamento real v_r proporcionalmente abaixo dos obtidos com solução exata, quando $v/L \geq 0.02$. Então a constante 0.6 foi substituída por outra, de valor 0.9, obtida por tentativas e que corrigiu os resultados para $v/L \leq 0.4$. Assim,

$$\eta_m \cong -0.9 \left(\frac{v}{L} \right)^2 \quad (\text{B.3})$$

onde v é o deslocamento linear clássico.

O segundo problema ocorre em vigas múltiplas radiais (ver figura B.3) e a solução para o deslocamento real v_r , adaptada da bibliografia [34,77], é obtida de

$$v_r + \frac{\pi^3}{32} \frac{A_{eq} E}{F} \frac{v}{L^3} v_r^3 - v = 0 \quad (\text{B.4})$$

onde $A_{eq} = h_0 b_{0eq}$ é a área da secção transversal de uma viga equivalente, determinada supondo que sua energia de deformação à tração seja a mesma da viga de secção variável que ela representa. Os valores de b_{0eq} são indicados na figura B.3.

Nesse tipo de vigas surge uma força axial P , dada por

$$P = \frac{\pi^2}{16} E A_{eq} \left(\frac{v}{L} \right)^2 \quad (\text{B.5})$$

que causa uma não-linearidade elétrica η_e de segunda ordem, quando são usados extensômetros resistivos axialmente orientados. A deformação axial $\epsilon_a = P/(E A_{eq})$ provoca uma não-linearidade elétrica $\eta_e = -4 S_g \epsilon_a / 2$, em ponte de Wheatstone completa.

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Fator de condições de contorno	δ	-	$\delta=1$, se a extremidade livre tem rotação não nula $\delta=2$, se a extremidade livre tem rotação nula
Pos. relativa	x'	-	$x'=x/L$ L : comprimento
Alturas	h_o, h	mm	h_o : referência ; h : efetiva
Altura relativa	h'	-	$h'=h/h_o$
Larguras	b_o, b	mm	b_o : referência ; b : efetiva
Larg. relativa	b'	-	$b'=b/b_o$
Área da secção transversal	A_o, A	mm ²	$A = b h$: efetiva. $A_o = b_o h_o$: referência
Área relativa	A'	-	$A' = A/A_o = b' h'$
Momento de inércia	I_{oz}, I_z	mm ⁴	$I_z = b h^3 / 12$: efetivo $I_{oz} = b_o h_o^3 / 12$: referência
M. inércia rel.	I'_z	-	$I'_z = I_z / I_{oz} = b' h'^3$
M. inércia das vigas duplas	I	mm ⁴	$I = 2 I_{oz} I'_z$ $I' = I'_z \left[1 + \frac{3}{h_o^2} \left(\frac{f}{h_o} + 2 - h' \right)^2 \right]$
M. fletor refer.	M_o	Nmm	$M_o = W L / \beta$
M. f. concentrado	M_d	Nmm	$M_d = M_o M'_d$
Mom. de reação	M_A	Nmm	$M_A = M_o M'_A$
M. conc. relativo	M'_d	-	$M'_d = d/L$
M. reação relat.	M'_A	-	$M'_A = 1/\delta + M'_d$
M. fletor em x	M_z	Nmm	$M_z = - M_o M'_z$
M. fl. rel. em x	M'_z	-	$M'_z = M'_A - x'$
Força cort. em x	V_y	N	$V_y = F - W / \beta$
Deslocamento linear básico	v_b	mm	$v_b = \frac{6 F}{E b_o} v'_b$
Desl. linear do el. elástico	v	mm	$v = \alpha v_b = 6 \frac{\alpha}{\beta} W v'_b / (E b_o)$

Fig. B.2 - Formulação de elementos elásticos tipo viga.

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Deslocamento linear básico relativo	v'_b	-	$v'_b = \left(\frac{L}{h_0}\right)^3 v'$ <p>vigas simples ou múltiplas radiais uniformes :</p> $v' = 2 \left[M'_A (M'_A - 1) + \frac{1}{3} \right]$ <p>vigas multifuro circulares radiais :</p> $v' = 2 \int_0^1 \frac{(1/\delta - x')^2}{I'_z} dx'$ <p>vigas trapézio onde $0 < c = a/b_0 < 1$:</p> $v' = v'_L + v'_d$ $v'_L = \frac{1}{(1-c)^3} \left\{ (1-c) [1+c-4(1-(1-c)M'_A)] - 2[1-(1-c)M'_A]^2 \ln c \right\}$ $v'_d = \frac{2\beta}{3c} \left(\frac{d}{L}\right)^3$ <p>vigas duplas :</p> $v' = v'_w + v'_{Md}$ <p>uniformes $\rightarrow v'_w = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{3}$</p> $v'_{Md} = \beta \frac{d}{L} \frac{1}{2I'}$ <p>furo circular $\rightarrow v'_w = 2 \int_0^1 \frac{(1/\delta - x')^2}{I'_z} dx'$</p> $v'_{Md} = \beta \frac{d}{L} \int_0^1 \frac{x'}{I'} dx'$
Constante de mola	C	N/m	$C = \frac{W}{v} = \frac{\beta}{\delta \alpha} \frac{E b_0}{v'_b}$

Fig. B.2 - Formulação de elementos elásticos tipo viga (cont.).

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Tensão flexão na superf. sup. externa da viga	σ_f	MPa	$\sigma_f = -6 \frac{F L}{b_o h_o^2} \sigma'_f$
Tensão de flexão relativa	σ'_f	-	$\sigma'_f = M'_z h' / I'_z$ Em vigas duplas : $\sigma'_f = \sigma'_w + \sigma'_{Md}$ $\sigma'_w = \frac{(1/\delta - x')}{I'_z} h'$ $\sigma'_{Md} = \frac{\beta M'_d}{I'} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{f}{h_o}\right)$
Tensão cisalhante máxima	τ_{max}	MPa	$\tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{F}{A_o} \tau'_{max}$
tensão cis. max. relativa	τ'_{max}	-	$\tau'_{max} = 1/A'$
Posição relativa da max. tensão de flexão	x'_{max}	-	conforme indicado na figura B.3
Def. de flexão na superfície sup. externa	ϵ_f	$\mu m/m$	$\epsilon_f = -6 \frac{F L}{E b_o h_o^2} \epsilon'_f$
Def. principais:			
- flexão	ϵ_1	$\mu m/m$	$\epsilon_1 = \epsilon_f$
- cisalhante	ϵ_1	$\mu m/m$	$\epsilon_1 = \frac{1+\nu}{E} \left(\frac{3}{2} \frac{F}{A_o}\right) \epsilon'_1$
Def. princ. rel.:			
- flexão	ϵ'_1	-	$\epsilon'_1 = \epsilon'_f = \sigma'_f$
- cisalhante	ϵ'_1	-	$\epsilon'_1 = \tau'_{max}$
Sensibilidade de def. do modelo básico :	S_{eb}	$\frac{\mu m/m}{N}$	$S_{eb} = \frac{\bar{\epsilon}}{F}$ $S_{eb} = \frac{6 L f_p}{E b_o h_o^2} |\epsilon'_1 - \epsilon'_2|$ $S_{eb} = \frac{1+\nu}{E} \frac{3}{2} \frac{f_p}{A_o} |\epsilon'_1 - \epsilon'_2|$ $\epsilon'_2 = -\epsilon'_1$, para as vigas considerados.
Sensib. de def. do el. elástico	S_e	$\frac{\mu m/m}{N}$	$S_e = S_{eb} / \beta$

Fig. B.2 - Formulação de elementos elásticos tipo viga (cont.).

DENOMINAÇÃO	SÍMBOLO	UNIDADE	DEFINIÇÕES E FÓRMULAS
Sensibilidade de desloc. do modelo básico	S_{vb}	mm/N	$S_{vb} = \frac{6 v'_b}{E b_o}$
Sensibilidade de desloc. do el. elástico	S_v	mm/N	$S_v = \frac{v}{W} = \frac{\alpha v_b}{\beta F} = \frac{\alpha}{\beta} S_{vb}$

Fig. B.2 - Formulação de elementos elásticos tipo viga (cont.).

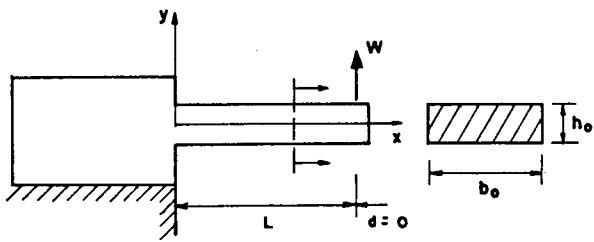
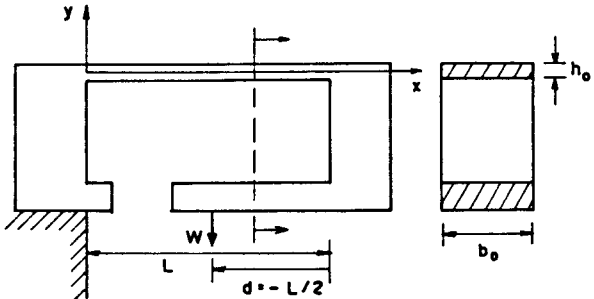
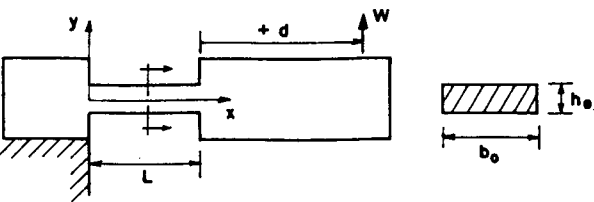
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 3 ; L/b_o \geq 1$ $\beta = 1 ; \delta = 1 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1 ; x'_{max} = 0$ $V_t = b_o h_o L$ $V_o = 0$
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 3 ; L/b_o \geq 1$ $\beta = 1 ; \delta = 2 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1 ; x'_{max} = 0$ $V_t = b_o h_o L$ $V_o \cong b_o h_o L + 6 b_o^3$
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 3 ; L/b_o \geq 1$ $\beta = 1 ; \delta = 1 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1 ; x'_{max} = 0$ $V_t = b_o h_o L$ $V_o \cong 3 b_o h_o d$

Fig. B.3 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo viga.

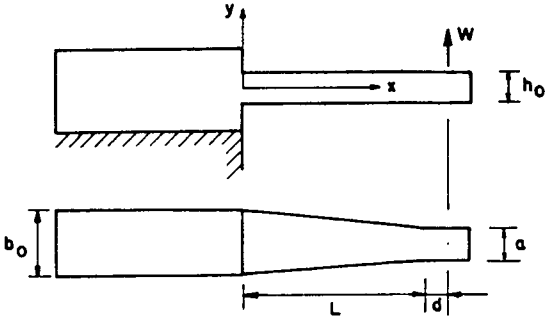
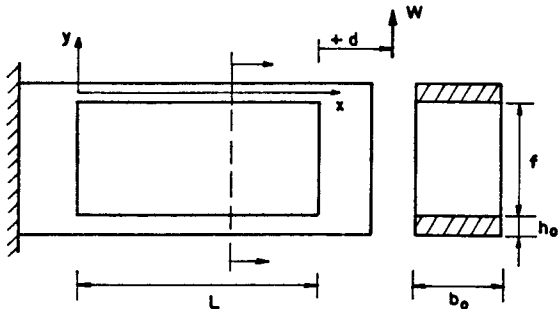
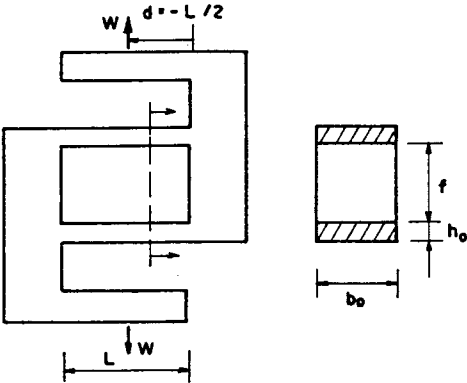
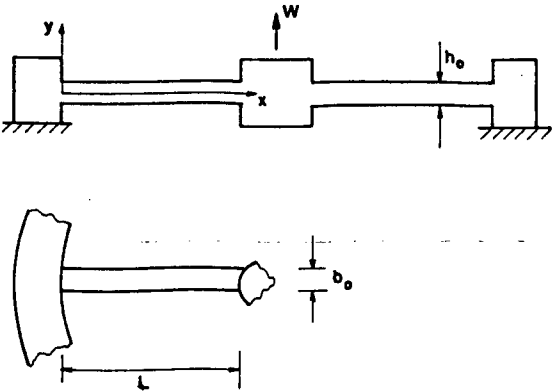
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	<p>validade :</p> $L/h_0 \geq 3 ; L/b_0 \geq 2$ $\beta = 1 ; \delta = 1 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1 - (1 - \frac{a}{b_0}) x' ; x'_{\max} = 0$ $V_t = h_0 (a + b_0) L/2 + a d h_0$ $V_o = a d h_0$
	<p>validade :</p> $L/h_0 \geq 3 ; L/b_0 \geq 1$ $\beta = 2 ; \delta = 2 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1$ $x'_{\max} = 0 \text{ se } d \geq 0$ $x'_{\max} = 1 \text{ se } d < 0$ $V_t = 2 b_0 h_0 L$ $V_o = 2 b_0^2 f$
	<p>validade :</p> $L/h_0 \geq 3 ; L/b_0 \geq 1$ $\beta = 2 ; \delta = 2 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1$ $x'_{\max} = 0$ $V_t = 2 b_0 h_0 L$ $V_o \cong 2 b_0^2 f + 4 h_0 b_0 L + 12 b_0^2 h_0$
	<p>validade :</p> $L/h_0 \geq 3 ; L/b_0 \geq 1$ $\beta = 4 ; \delta = 2 ; \alpha = 1$ $h' = 1 ; b' = 1$ $x'_{\max} = 0$ $V_t = 4 b_0 h_0 L$ $V_o \cong 3 \pi b_0^2 h_0$ $b_{o\text{eq}} = b_0$

Fig. B.3 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo viga (cont.).

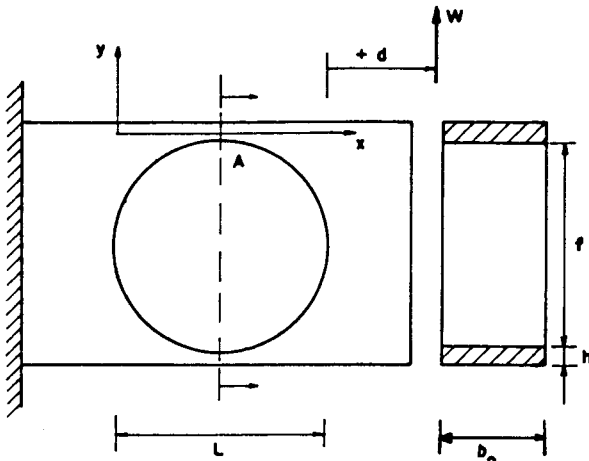
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 4 \quad ; \quad L/b_o \geq 1.6$ $\beta = 2 \quad ; \quad \delta = 2 \quad ; \quad \alpha = 1$ $b' = 1$ $h' = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{h_o} \right) \left[1 - \sqrt{1 - (2x' - 1)^2} \right]$ $x'_{\max} = \frac{1 - s A_f}{2} + s x'_d \quad (17)$ $s = 1 \quad \text{se } d \geq 0$ $s = -1 \quad \text{se } d < 0$ $A_f = \frac{1}{\sqrt{2} c} \left[-(3c^2 + 4c + 4) + ((3c^2 + 4c + 4)^2 + 16(1+c)c^2)^{1/2} \right]^{1/2}$ $c = \frac{1}{h_o/L}$ $x'_d = \left[0.0381 \left( \frac{|d|}{L} \right)^{0.845} \right]$ $\left[e^{-2.025(h_o/L)} \sin \Pi(h_o/L) \right]$ <p>Se $|\sigma_A| > |\sigma_{x\max}|$, $x'_{\max} = 0.5$</p> $\sigma_A = K_A \sigma_{Md}$ $K_A = \frac{1}{0.5 + h_o/L}, \quad \text{se } \frac{h_o}{L} < 0.5$ $K_A = 1, \quad \text{se } \frac{h_o}{L} \geq 0.5$ $V_t = b_o L^2 \left(1 - \frac{\Pi}{4} \right) + 2 b_o h_o L$ $V_o = 2b_o^2 (L + 2 h_o)$

Fig. B.3 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo viga (cont.).

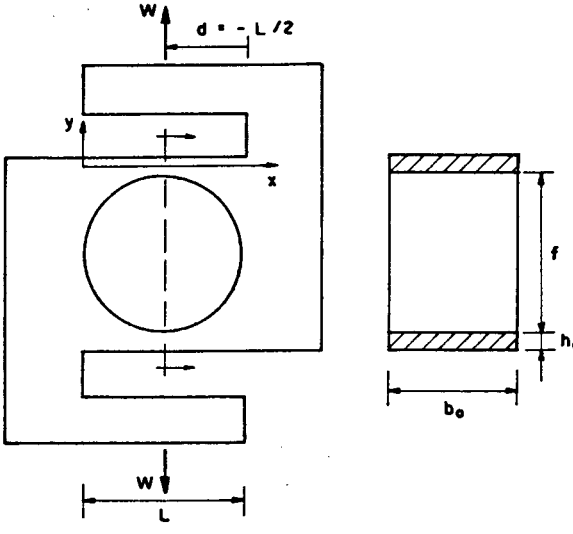
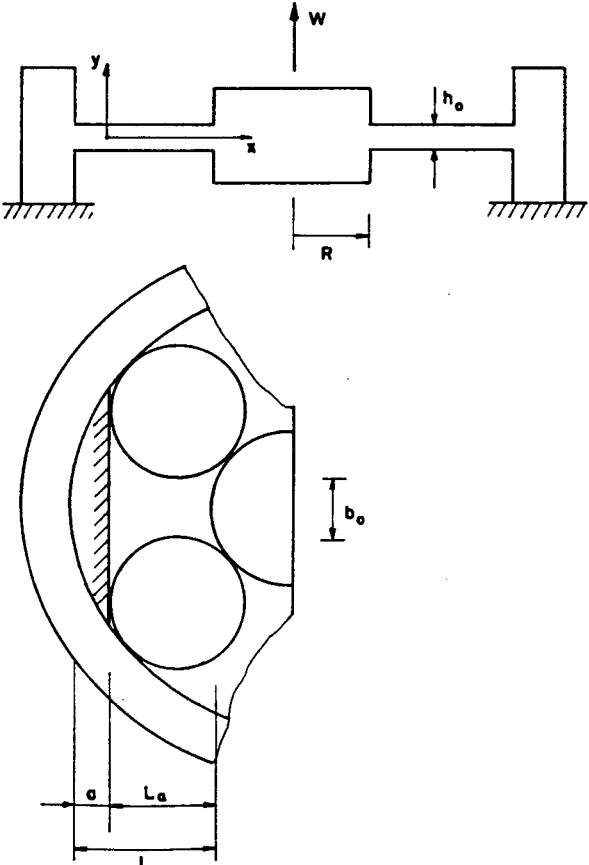
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 4 ; L/b_o \geq 1.6$ $\beta = 2 ; \delta = 2 ; \alpha = 1$ $b' = 1$ $h' = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{h_o} \right) \left(1 - \sqrt{1 - (2x' - 1)^2} \right)$ $x'_{\max} = \frac{1 - s A_f}{2} + s x'_d$ $V_t = b_o L \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) + 2 b_o h_o L$ $V_o = 2 b_o L^2 + 4 b_o h_o L + 16 h_o b_o^2$
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 3 ; L/b_o \geq 2$ $\beta = 4n_f ; n_f : \text{no. de furos por quadrante}$ $\delta = 2 ; \alpha = 1$ $h' = 1$ $b' = 1 + \frac{L}{b_o} \left[1 - \sqrt{1 - (2x' (1 - a') - 1)^2} \right]$ $a' = \frac{a}{L} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{b_o}{L} \right] \left[\frac{1 - \cos \alpha_v}{\sin \alpha_v} \right]$ $\alpha_v = \frac{\pi}{4n_f}$ $L_a = L (1 - a') \quad x' = \frac{x}{L_a}$ $x'_{\max} = \frac{1 - \cos \gamma}{2 (1 - a')}$ $\cos \gamma = \left[\frac{a' - (1 + b_o/L) \sqrt{q - 1}}{q} \right]$ $q = a'^2 + (1 + b_o/L)^2$ $V_t = \pi h_o L^2 (1 - n_f + 2 R/L)$ $V_o = 3 \pi R^2 h_o$

Fig. B.3 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo viga (cont.)

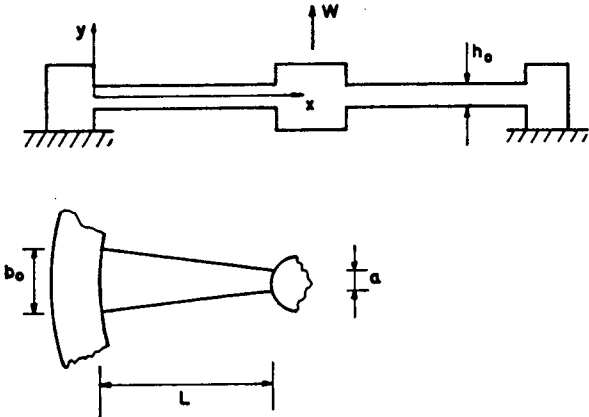
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	$R = \frac{L}{2} \left(\frac{1 + b_o/L}{\text{sen } \alpha_v} - 1 \right)$ $b_{oeq} = \frac{b_o}{\int_0^1 \frac{dx'}{b'}}$
	<p>validade :</p> $L/h_o \geq 3 ; \quad L/b_o \geq 2$ $\beta = 4 ; \quad \delta = 2 ; \quad \alpha = 1$ $h' = 1 ; \quad b' = 1 - \left(1 - \frac{a}{b_o} \right) x'$ $x'_{\max} = 1 , \quad \text{para } a < b_o$ $V_t = 2 h_o L (a + b_o)$ $V_o \cong 3 \pi a^2 h_o$ $b_{oeq} = \frac{b_o - a}{\ln (b_o/a)}$

Fig. B.3 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo viga (cont.).

B.2 Elementos elásticos tipo placa circular

O modelo básico é uma placa circular de espessura h_o uniforme, com borda externa fixa, borda interna guiada e carga centrada. Na formulação adaptada de [77], como segue, as dimensões indicadas referem-se aos esboços dos elementos elásticos representados na figura B.4. Nessa figura também se encontram propriedades geométricas associadas à formulação.

Deslocamento máximo (em $r=b$) do modelo básico:

$$v_b = - \frac{F a^2}{2 \pi D} v_b' \quad (B.6)$$

$$D = \frac{E h_o^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$v'_b = \left(\frac{a}{b}\right) \left(\frac{C_2 L_\sigma}{C_5} - L_a \right)$$

Deslocamento máximo do elemento elástico:

$$v = \alpha v_b \quad (B.7)$$

Momentos radial (M_r) e tangencial (M_t) do modelo básico:

$$M_r = \frac{F}{2\pi} M'_r \quad (B.8)$$

$$M_t = \frac{F}{2\pi} M'_t \quad (B.9)$$

$$M'_r = M'_{rb} F_\sigma - \frac{r}{b} G_\sigma$$

$$M'_{rb} = \left(\frac{a}{b}\right) \left(\frac{L_\sigma}{C_5}\right)$$

$$M'_t = (1-\nu^2) (M'_{rb} F_\sigma - \frac{r}{b} G_\sigma) + \nu M'_r$$

Tensões radial (σ_r) e tangencial (σ_t) nas superfícies externas do modelo básico:

$$\sigma_r = \frac{3F}{\pi h_o^2} \sigma'_r \quad (B.10)$$

$$\sigma_t = \frac{3F}{\pi h_o^2} \sigma'_t \quad (B.11)$$

$$\sigma'_r = \frac{M'_r}{h'^2}$$

$$\sigma'_t = \frac{M'_t}{h'^2}$$

Nas placas de espessura uniforme, $h'=1$ e nas placas de espessura variável,

$$h' = 1 + \left(\frac{c}{h_o} - 1 \right) \frac{1 - r/r_o}{1 - b/r_o}, \text{ se } r \leq r_o$$

$$h' = 1 + \left(\frac{c}{h_0} - 1 \right) \frac{r/r_0 - 1}{a/r_0 - 1}, \text{ se } r \geq r_0$$

$$r_0 = \frac{a}{2} \left(1 + \frac{b}{a} \right)$$

Tensão máxima (em $r=b$):

$$\sigma_{r\max} = \frac{3 F}{\pi h_0^2} M'_{rb} \quad (\text{B.12})$$

Deformações radial (ϵ_r) e tangencial (ϵ_t) nas superfícies externas do modelo básico:

$$\epsilon_r = \frac{3 F}{\pi E h_0^2} \epsilon'_r \quad (\text{B.13})$$

$$\epsilon_t = \frac{3 F}{\pi E h_0^2} \epsilon'_t \quad (\text{B.14})$$

$$\epsilon'_r = \sigma'_r - \nu \sigma'_t$$

$$\epsilon'_t = \sigma'_t - \nu \sigma'_r$$

Coeficientes alfa-numéricos:

$$C_2 = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \left(1 + 2 \ln \frac{a}{b} \right) \right]$$

$$C_5 = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]$$

$$C_8 = \frac{1}{2} \left[1 + \nu + (1 - \nu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]$$

$$L_9 = \frac{1}{4} \left(\frac{b}{a} \right) \left\{ \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 + 1 \right] \ln \left(\frac{a}{b} \right) + \left(\frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right\}$$

$$L_{10} = \frac{1}{4} \left(\frac{b}{a} \right) \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 - 1 + 2 \ln \frac{a}{b} \right]$$

$$L_{12} = \left(\frac{b}{a} \right) \left\{ \frac{1 + \nu}{2} \ln \left(\frac{a}{b} \right) + \frac{1 - \nu}{4} \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \right\}$$

$$F_5 = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right]$$

$$F_8 = \frac{1}{2} \left[1 + \nu + (1 - \nu) \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right]$$

$$G_6 = \begin{cases} 0 & , \text{ se } r \leq b \\ \frac{1}{4} \left(\frac{b}{r} \right) \left[\left(\frac{b}{r} \right)^2 - 1 + 2 \ln \frac{r}{b} \right] & , \text{ se } r > b \end{cases}$$

$$G_9 = \begin{cases} 0 & , \text{ se } r \leq b \\ \frac{b}{r} \left\{ \frac{1+\nu}{2} \ln \frac{r}{b} + \frac{1-\nu}{4} \left[1 - \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right] \right\} & , \text{ se } r > b \end{cases}$$

O dimensionamento da placa de espessura variável é realizado inicialmente para uma espessura equivalente uniforme h_{eq} . Então, após arbitrar a menor espessura h_0 , a maior espessura c é calculada por

$$c = 2 h_{eq} - h_0 \quad (B.15)$$

onde $h_0 \leq h_{eq}$.

A espessura equivalente uniforme é empregada em cálculos de deslocamentos, enquanto que as tensões e deformações, numa posição radial r qualquer, são calculadas considerando a variação da espessura.

Constante de mola do elemento elástico:

$$C = \frac{W}{v} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{2 \pi D}{a^2 v_b'} \quad (B.16)$$

D é definido em (B.6).

Sensibilidade de deformação do elemento elástico:

Para montagem de extensômetros em ponte de Wheatstone, onde $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_r$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = \varepsilon_t$, a sensibilidade de deformação S_ε do elemento elástico é

$$S_\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}}{W} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4}{\beta F} = \frac{S_{\varepsilon b}}{\beta} \quad (B.17)$$

onde

$$S_{\varepsilon b} = \frac{3 f_p}{\pi E h_o^2} |\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2| \quad (B.18)$$

é a sensibilidade de deformação do modelo básico.

sensibilidade de deslocamento do modelo básico:

$$S_v = \frac{v}{W} = \frac{\alpha}{\beta} S_{vb} \quad (B.19)$$

onde

$$S_{vb} = \frac{a^2 v'_b}{2 \pi D} \quad (B.20)$$

é a sensibilidade de deslocamento do modelo básico.

Não-linearidade elétrica do elemento elástico:

$$\eta_e = - \frac{3 S_g W}{\pi \beta E h_o^2} |\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2| \quad (B.21)$$

onde S_g é a sensibilidade de cada extensômetro (*gauge factor*).

Não-linearidade mecânica do elemento elástico:

$$\eta_m = \frac{v_r}{v} - 1 = \frac{v_{rb}}{v} - 1 \quad (B.22)$$

O deslocamento real v_{rb} do modelo básico, como mostrado em [10], pode ser determinado na expressão

$$\frac{1}{B} \left(\frac{E h_o^3}{a^2} \right) v_{rb} + \frac{A}{B} \left(\frac{E h_o}{a^2} \right) v_{rb}^3 = F \quad (B.23)$$

onde

$$B = 1.910 (1 - \nu^2) v'_b$$

$$A = 1.769 (1 - \nu^2) v'_b, \text{ para borda externa radialmente deslocável e}$$

$$B = 1.910 (1 - \nu^2) v'_b$$

$$A = 3.896 (1 - \nu^2) v'_b, \text{ para borda externa fixa.}$$

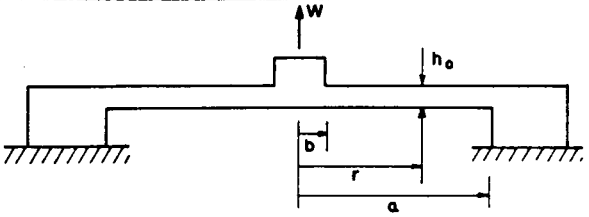
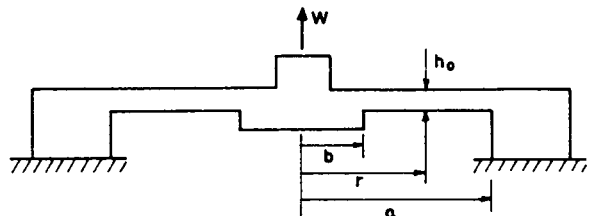
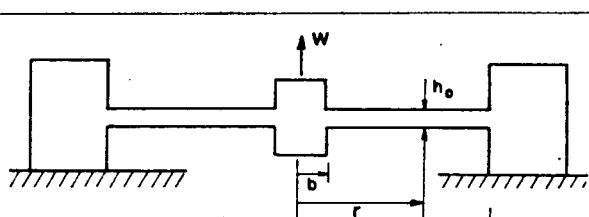
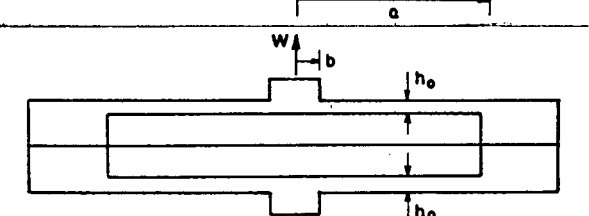
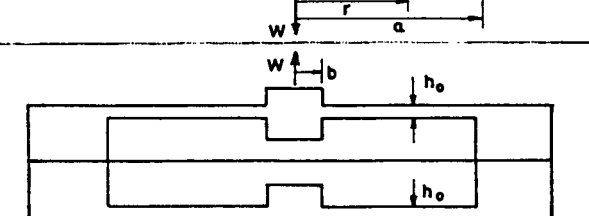
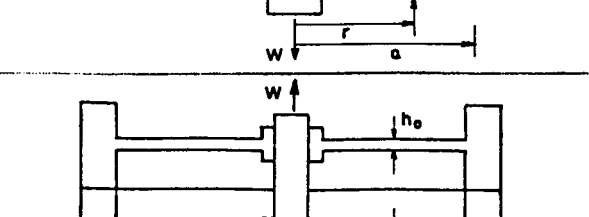
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	$\beta = 1$ $\alpha = 1$ $V_t = \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 3 \Pi b^2 h_o$
	$\beta = 1$ $\alpha = 1$ $V_t = \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 3 \Pi b^2 h_o$
	$\beta = 1$ $\alpha = 1$ $V_t = \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 5 \Pi b^2 h_o$
	$\beta = 1$ $\alpha = 2$ $V_t = 2 \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 6 \Pi b^2 h_o$
	$\beta = 1$ $\alpha = 2$ $V_t = 2 \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 10 \Pi b^2 h_o$
	$\beta = 2$ $\alpha = 1$ $V_t = 2 \Pi (a^2 - b^2) h_o$ $V_o \cong 18 \Pi b^2 h_o$

Fig. B.4 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo placa circular.

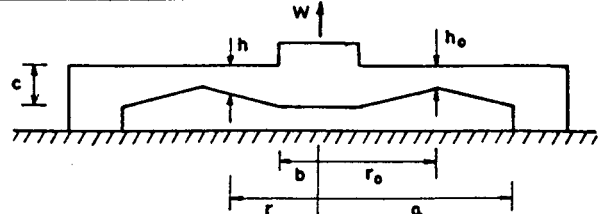
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	$\beta = 1$ $\alpha = 1$ $V_t = \pi (a^2 - b^2) \left(\frac{c + h_0}{2} \right)$ $V_o \cong \pi b^2 (2c + h_0)$

Fig. B.4 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo placa circular (cont.).

B.3 Elementos elásticos tipo coluna

O modelo dos elementos elásticos tipo coluna é uma barra prismática, de secção transversal qualquer, que pode ser submetida tanto a esforços de tração quanto de compressão. As variações geométricas desse modelo são mostradas na figura B.5, bem como as propriedades geométricas relacionadas à sua formulação.

A formulação de tais elementos elásticos é a mais simples entre as deduzidas, pois a tensão atuante σ é dada pela expressão

$$\sigma = K_t \frac{W}{A} \quad (\text{B.24})$$

onde W é a carga aplicada, A a área da secção transversal e K_t o fator de concentração de tensões [75] tal que

$$K_t = 2 + \left(1 - \frac{c}{a}\right)^3 \quad (\text{B.25})$$

se a barra tiver secção transversal retangular, e um furo circular de diâmetro c , perpendicular à face prismática de maior largura a (figura B.5). Para as demais variações de colunas da figura B.5, $K_t=1$.

O uso da expressão (B.24), no dimensionamento preliminar do elemento elástico, está sujeito à modificação do valor da tensão

admissível, caso o elemento elástico seja submetido a cargas de compressão, quando pode surgir o fenômeno da flambagem. Essa modificação consiste em substituir o valor da tensão admissível estática σ_{adm} , normalmente empregada, pelo valor reduzido $\sigma_{adm-red}$ obtido de [22,77], após as considerações que seguem.

No fenômeno da flambagem, o elemento elástico pode entrar em colapso, quando a tensão atuante atingir um valor $\sigma_{cr} < \sigma_{adm}$. O valor σ_{cr} depende do material e do índice de esbeltez λ , dado por

$$\lambda = \mu \frac{L}{r} \quad (B.26)$$

onde μ é o fator que leva em conta as condições de contorno, L é a altura da coluna e r seu menor raio de giração.

Para calcular σ_{cr} , pode-se empregar a fórmula de EULER, válida para $\lambda > \lambda_{lim}$, onde

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.8 \sigma_c}} \quad (B.27)$$

σ_p é o limite de proporcionalidade, assumido como $\sigma_p = 0.8 \sigma_c$, e σ_c é a tensão limite de escoamento.

Nos elementos elásticos tipo coluna, dos transdutores de força, dificilmente ocorre $\lambda > \lambda_{lim}$. Então descarta-se a possibilidade de usar a fórmula de EULER. Nesse caso, a tensão crítica σ_{cr} geralmente é obtida de modo empírico [22,77].

Em elementos tubulares, de secção transversal circular, onde o diâmetro externo é a e o interno b , a tensão crítica recomendada [77] é

$$\sigma_{cr} = 0.12 E \frac{a - b}{a + b} \quad (B.28)$$

Assim, se essa tensão for menor do que a de limite de escoamento, a tensão admissível reduzida é

$$\sigma_{\text{adm-red}} = \frac{\sigma_{\text{cr}}}{N_s} \quad (\text{B.29})$$

onde $N_s = 1.8$ é a segurança de carga de flambagem adotada.

Se $\sigma_{\text{cr}} \geq \sigma_e$, a tensão crítica do elemento tubular é determinada como nos outros elementos sob carga de compressão, indicados na figura B.5. Para eles, calcula-se σ_{cr} pela fórmula parabólica seguinte, conforme se obtém de [22,77].

$$\sigma_{\text{cr}} = \sigma_e \left(1 - 0.25 \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{lim}}} \right)^2 \right) \quad (\text{B.30})$$

Nesta formulação, usa-se $\lambda = 0.7L/r$ e, se $\lambda \leq 10$ [22], então

$$\sigma_{\text{adm-red}} = \sigma_{\text{adm}} \quad (\text{B.31})$$

Se $\lambda > 10$,

$$\sigma_{\text{adm-red}} = \varphi \sigma_{\text{adm}} \quad (\text{B.32})$$

onde

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{cr}}}{\sigma_e} \frac{N_E}{N_s} \quad (\text{B.33})$$

$N_E = 1.5$ é o coeficiente de segurança a carga estática usado e $N_s = 1.8$.

Deformações específicas axial (ϵ_1) e transversal (ϵ_2):

$$\epsilon_1 = \frac{W}{E A} \epsilon'_1 \quad (\text{B.34})$$

$$\epsilon_2 = \frac{W}{E A} \epsilon'_2 \quad (\text{B.35})$$

$$\epsilon'_1 = 1$$

$$\epsilon'_2 = \begin{cases} -\nu K_t, & \text{caso da barra com furo circular da figura B.5} \\ -\nu, & \text{outras barras e colunas da figura B.5} \end{cases}$$

Deslocamento máximo:

$$\nu = \frac{W L}{E A} \nu' \quad (\text{B.36})$$

onde

$$v' = \begin{cases} v'_c + v'_{L-c} & , \text{ para a barra com furo circular da figura B.5} \\ v'_c = \frac{a}{L} \left[\frac{2}{(1-(c/a))^{1/2}} \tan^{-1} \left(\frac{1+c/a}{1-c/a} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \\ v'_{L-c} = 1 - \frac{c}{L} \\ 1 & , \text{ para outras barras e colunas da figura B.5} \end{cases}$$

Constante de mola :

$$C = \frac{E A}{L v'} \quad (\text{B.37})$$

Sensibilidade de deformação :

$$S_e = \frac{f_P}{E A} |\epsilon'_1 - \epsilon'_2| \quad (\text{B.38})$$

Sensibilidade de deslocamento :

$$S_v = \frac{L v'}{E A} \quad (\text{B.39})$$

Não-linearidade elétrica de primeira ordem :

$$\eta_e = -S_g(\epsilon_1 + \epsilon_2) = -\frac{S_g W}{E A} |\epsilon'_1 + \epsilon'_2| \quad (\text{B.40})$$

Não-linearidade mecânica de primeira ordem :

A deformação específica axial real é

$$\epsilon_r = \ln(1 + \epsilon_1) = \epsilon_1 - \frac{1}{2} \epsilon_1^2 + \frac{1}{3} \epsilon_1^3 - \dots = \epsilon_1 (1 - \epsilon_1/2 + \dots)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_1 (1 + \eta_m)$$

onde

$$\eta_m \cong -\frac{1}{2} \epsilon_1 + \frac{1}{3} \epsilon_1^2 - \dots \cong -\epsilon_1/2$$

Assim, a não-linearidade mecânica de primeira ordem é

$$\eta_m \cong -\frac{W}{2 E A} \epsilon'_1 \quad (\text{B.41})$$

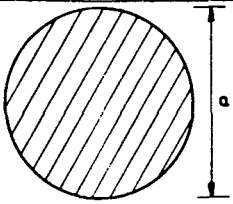
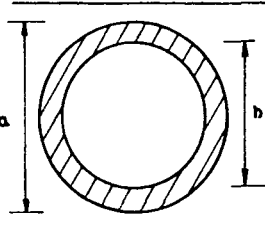
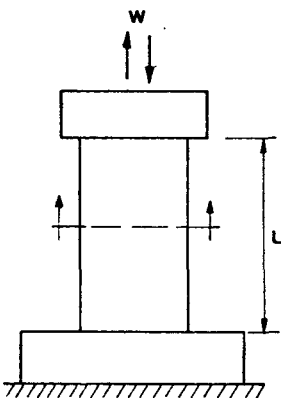
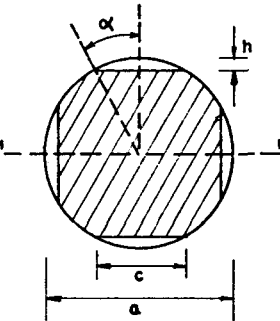
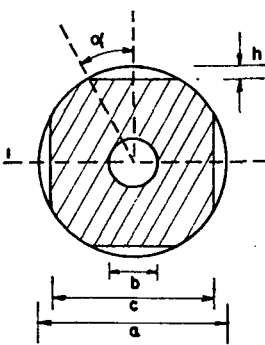
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	$A = \pi a^2 / 4$ $r = a / 2$ $V_t = A L$ $V_o = 0$
	$A = \pi (a^2 - b^2) / 4$ $r = (a^2 + b^2)^{1/2} / 2$ $V_t = A L$ $V_o = 0$
	 $\alpha = \tan^{-1} \frac{c}{(a^2 - b^2)^{1/2}}$ $A = a^2 (\pi/4 - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)$ $h = a(1 - \cos \alpha)/2$ $I_{11} = \frac{a^4}{64} (\pi - 4\alpha) + \frac{ac}{16} \cos \alpha \left(\frac{c^2}{3} + a^2 \cos^2 \alpha \right)$ $r = (I_{11} / A)^{1/2}$ $V_t = AL$ $V_o = 0$
	$\alpha = \tan^{-1} \frac{c}{(a^2 - b^2)^{1/2}}$ $A = a^2 (\pi/4 - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) - \pi b^2 / 4$ $h = a(1 - \cos \alpha)/2$ $I_{11} = \frac{a^4}{64} (\pi - 4\alpha) + \frac{ac}{16} \cos \alpha \left(\frac{c^2}{3} + a^2 \cos^2 \alpha \right) - \pi b^4 / 64$ $r = (I_{11} / A)^{1/2}$ $V_t = A L \quad V_o = 0$

Fig. B.5 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo columna.

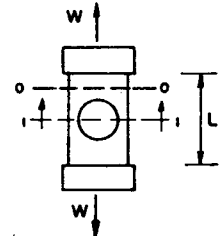
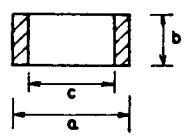
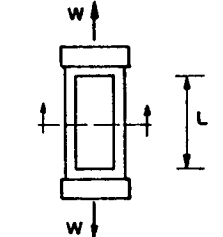
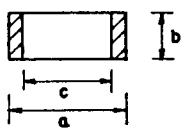
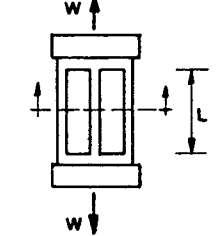
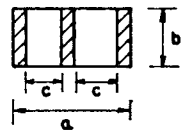
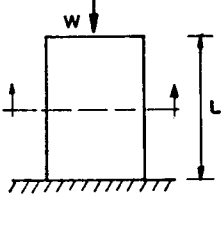
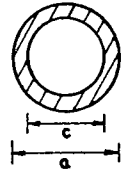
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
 	$A_{11} = (a - c) b$ $A_{00} = a b$ $V_t = c a b \left(1 - \frac{\pi}{4} \frac{c}{a}\right)$ $V_o = (L - c) a b$
 	$A = (a - c) b$ $V_t = A L$ $V_o = 0$
 	$A = (a - 2 c) b$ $V_t = A L$ $V_o = 0$
 	$A = \Pi (a^2 - c^2) / 4$ $r = (a^2 + c^2)^{1/2} / 2$ $V_t = A L$ $V_o = 0$

Fig. B.5 - Propriedades geométricas de elementos elásticos tipo coluna (cont.).

B.4 Elementos elásticos tipo anel

Consideram-se 7 formas de anéis para as quais formularam-se 5 modelos distintos, a fim de obter o grupo de características requeridas no dimensionamento e em outros cálculos.

Essas características foram deduzidas começando sempre pela distribuição do momento fletor. Para determiná-lo, necessitou-se conhecer o momento m_H na secção que contém o diâmetro horizontal de cada modelo, utilizando o teorema de CASTIGLIANO. A expressão desse

momento é da forma

$$M_H = \frac{W b_m}{2} M'_H \quad (B.42)$$

onde W é a força aplicada, cuja linha de ação contém o diâmetro vertical do anel e b_m (braço do momento) e M'_H (momento relativo) são indicados na figura B.6, para cada modelo de anel considerado.

A distribuição dos momentos é importante para determinar as tensões máxima σ_{max} (uso no dimensionamento preliminar), interna σ_i e externa σ_e , no diâmetro horizontal, onde podem ser colados extensômetros resistivos. Essas tensões são da forma

$$\sigma_i = \frac{W}{b c} \sigma'_i \quad (B.43)$$

$$\sigma_e = \frac{W}{b c} \sigma'_e \quad (B.44)$$

$$\sigma_{max} = \frac{W}{b c} \sigma'_{max} \quad (B.45)$$

Os valores relativos σ'_i , σ'_e , σ'_{max} e as dimensões b, c são indicados na figura B.6, bem como os outros valores relativos e dimensões que estão nas expressões seguintes.

Deformações específicas no diâmetro horizontal:

$$\varepsilon_1 = \frac{W}{E b c} \varepsilon'_1 \quad (B.46)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{W}{E b c} \varepsilon'_2 \quad (B.47)$$

onde $\varepsilon'_1 = \sigma'_i$, $\varepsilon'_2 = \sigma'_e$

Sensibilidade de deformação :

$$S_e = \frac{W}{E b c} |\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2| \quad (B.48)$$

Não-linearidade elétrica :

$$\eta_e = - \frac{W S_g}{E A} |\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2| \quad (B.49)$$

Deslocamento vertical :

$$v_v = \frac{W b_m^3}{E I_o} v'_v \quad (B.50)$$

Constante de mola :

$$C = \frac{E I_o}{b_m^3 v'_v} \quad (B.51)$$

Sensibilidade de deslocamento :

$$S_v = \frac{b_m^3 v'_v}{E I_o} \quad (B.52)$$

Deslocamento horizontal :

$$v_H = \frac{W b_m^3}{E I_o} v'_H \quad (B.53)$$

Não-linearidade mecânica :

A força aplicada W causa uma variação v_H no diâmetro horizontal do anel. Em consequência disso, o momento muda em função da carga aplicada. Essa mudança é o principal fator responsável pela não-linearidade mecânica η_m , que é então determinada do mesmo modo aproximado como nos elementos elásticos tipo viga e de acordo com as deduções de BRAY [28,29]. Assim, o momento real M_{HR} dependente da carga é

$$M_{HR} = \frac{W}{2} \left(b_m - \frac{v_H}{2} \right) M'_H = \frac{W}{2} b_m M'_H (1 + \eta_m) \quad (B.54)$$

onde

$$\eta_m = - \frac{v_H}{2 b_m} \quad (B.55)$$

Momento de inércia básico :

$$I_o = \frac{b c^3}{12} \quad (B.56)$$

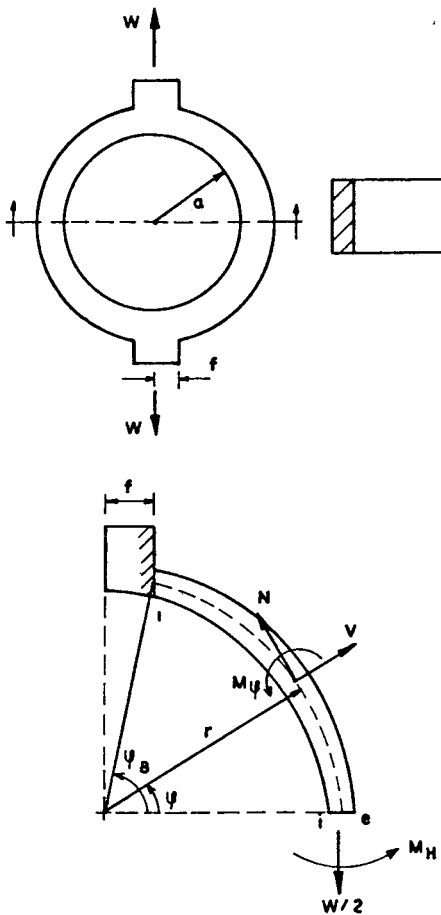
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
	$b_m = r \quad r = a + c/2$ $\varphi_B = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} [f / (r^2 - f^2)^{1/2}]$ $M_\varphi = - \frac{W b_m}{2} M'_\varphi$ $M'_\varphi = M'_H - 1 + \cos \varphi$ $M'_H = 1 - \frac{\sin \varphi_B}{\varphi_B}$ $\sigma'_i = \frac{1}{2} + \frac{M'_\varphi}{c/b_m} \frac{6 - c/r}{2 - c/r}$ $\sigma'_e = \frac{1}{2} - \frac{M'_H}{c/b_m} \frac{6 + c/r}{2 + c/r}$ $\sigma'_{x \max} = \frac{M'_\varphi}{c/b_m} \frac{6 - c/r}{2 - c/r}, \text{ no ponto } 1$ $v'_v = [(M'_H - 1)^2 + 1/2] \varphi_B + [2(M'_H - 1) + \frac{1}{2} \cos \varphi_B] \sin \varphi_B$ $v'_H = (1 - M'_H) (1 - \cos \varphi_B) - \frac{1}{4} (1 - \cos 2\varphi_B)$ $V_l = \pi b [(a+c)^2 - a^2] - 2fcb$ $V_o \cong 6fcb$

Fig. B.6 - Propriedades geométricas e valores relativos de elementos elásticos tipo anel.

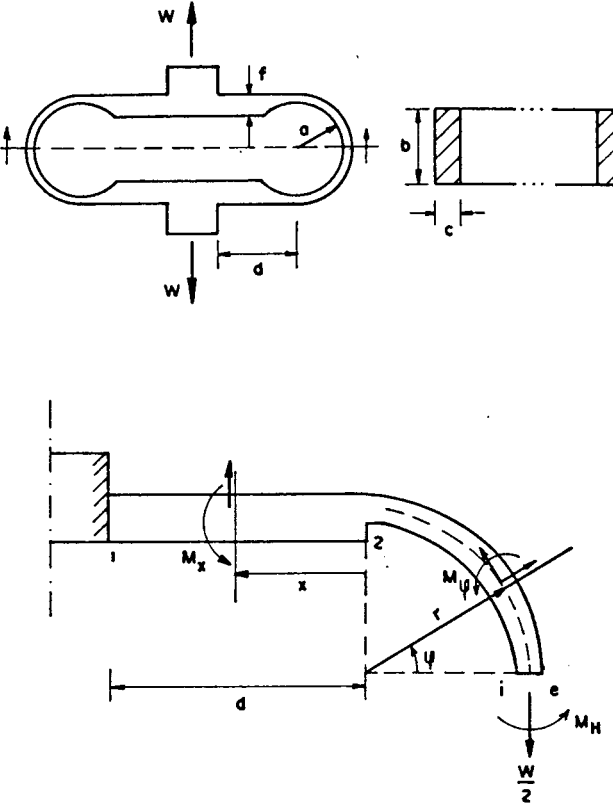
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	$b_m = d + r \quad r = a + c/2$ $M_\varphi = -\frac{W b_m}{2} M'_\varphi$ $M'_\varphi = M'_H - \frac{r}{b_m} (1 - \cos\varphi)$ $M_x = -\frac{W b_m}{2} M'_x$ $M'_x = M'_H - \frac{r}{b_m} - \frac{x}{b_m}$ $M'_H = \frac{\left(\frac{c}{f}\right)^3 \left(\frac{d}{r}\right) \left(2\frac{d}{b_m}\right) + \frac{r}{b_m} (\pi - 2)}{2 \left(\frac{c}{f}\right)^3 \left(\frac{d}{r}\right) + \pi}$ $\sigma'_i = \frac{1}{2} + \frac{M'_H}{c/b_m} \frac{6 - c/r}{2 - c/r}$ $\sigma'_e = \frac{1}{2} - \frac{M'_H}{c/b_m} \frac{6 + c/r}{2 + c/r}$ $\sigma'_1 = \frac{3 b_m c}{f^2} (M'_H - 1)$ $\sigma'_2 = (M'_H - \frac{r}{b_m}) \left(\frac{b_m}{c}\right) \frac{6 - c/r}{2 - c/r}$ <p>Tensão máxima : maior valor entre σ'_i, σ'_1, σ'_2.</p> $v'_v = \left(\frac{c}{f}\right)^3 \frac{d}{b_m} \left\{ \left[\left(\frac{r}{b_m}\right)^2 M'_H \left(\frac{r}{b_m} + \frac{d}{2b_m}\right) + \left(\frac{r}{b_m}\right) \left(\frac{d}{b_m}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{d}{b_m}\right)^2 \right] + \left\{ \left(\frac{r}{b_m}\right)^2 \left[\frac{r}{b_m} \left(\frac{3\pi}{4} - 2\right) - M'_H \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \right] \right\} \right\}$ $v'_H = \frac{r}{b_m} \left[\left(\frac{c}{f}\right)^3 \frac{d}{b_m} \left(1 - M'_H - \frac{d}{2b_m}\right) + \frac{r}{b_m} \left(\frac{r}{2b_m} - M'_H\right) \right]$ $V_t = \pi \left((a + c)^2 - a^2 \right) b + 4dfb$ $V_o \cong 4f^2 b$

Fig. B.6 - Propriedades geométricas e valores relativos de elementos elásticos tipo anel (cont.).

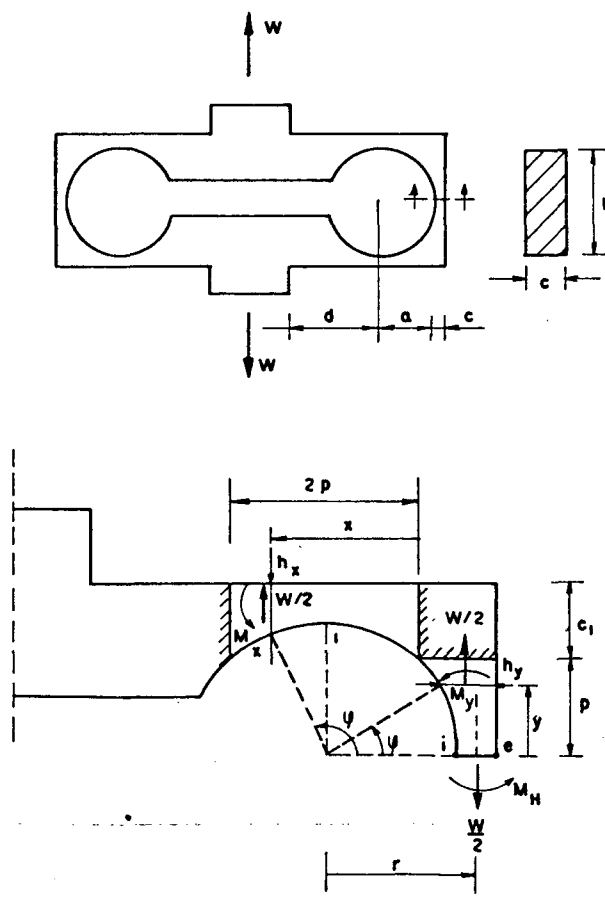
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	$v'_v = \frac{a}{b_m} \left\{ \left[(1-M'_H)(A'_1-A'_{1d}) - \frac{a}{r} (1-M'_H/2)(A'_2-A'_{2d}) + \frac{a^2}{r^2} (A'_4-a'_{4d}) \right] + \frac{c}{2r} \left[(M'_H + \frac{c}{2r})A'_1 - (M'_H + \frac{c}{r})A'_3 + \frac{c}{r} \frac{A'_5}{2} \right] \right\}$ <p>Coeficientes A'_1, A'_2, \dots na figura B.7</p> $V_t = ba^2 \left[4(1+\frac{c}{a})^2 - \pi - 4fc/a^2 \right]$ $V_o \cong 6 f^2 b$
	$h_x = c + a(1 - \sin\varphi)$ $h_y = c + a(1 - \cos\varphi)$ $r = a + c/2$ $b_m = r + d$ $c_1 = c + a(1 - \sqrt{2}/2)$ $p = a / \sqrt{2}$ $x = p - a \cos\varphi$ $y = a \sin\varphi$ $M_x = -\frac{W}{2} b_m M'_x$ $M'_x = M'_H - \frac{r}{b_m} (1 - \frac{a}{r} \cos\varphi)$ $M_y = -\frac{W}{2} b_m M'_y$ $M'_y = M'_H - \frac{a}{2b_m} (1 - \cos\varphi)$ $M'_H = \frac{a}{3b_m} \left[2 + \frac{c}{2a} (1 + \frac{A'_3}{A'_1}) \right]$ $\sigma'_i = k_{ti}/2 + 3 \frac{b_m}{c} M'_H$ $\sigma'_e = k_{te}/2 - 3 \frac{b_m}{c} M'_H$

Fig. B.6 - Propriedades geométricas e valores relativos de elementos elásticos tipo anel.

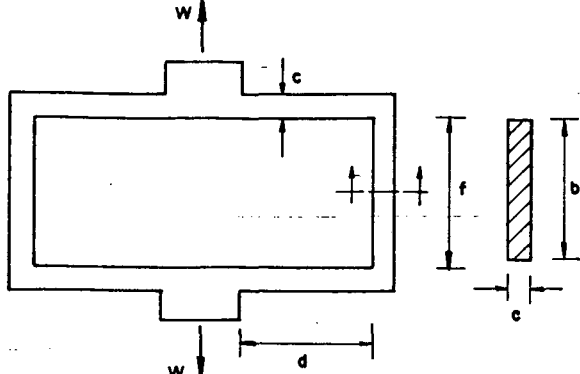
ELEMENTO ELÁSTICO	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS
	$\sigma'_1 = 3 \frac{b_m}{c} \left(\frac{r}{b_m} - M'_H \right)$ $k_{ti} = 6s^3 / (2s^3 + 2s^2 + s + 1)$ $k_{te} = (1 + s^2) k_{ti} / 2$ $s = 1 + c/a$ <p>Tensão máxima : maior valor entre σ_i, σ_1.</p> $v'_v = \frac{a}{b_m} \left\{ 2 \left[\frac{r}{b_m} \left(\frac{r}{b_m} - M'_H \right) A'_1 + \frac{a^2}{b_m^2} A'_4 \right] + \frac{c}{2b_m} \left[(M'_H + \frac{c}{2b_m}) A'_1 - (M'_H + \frac{c}{b_m}) A'_3 + \frac{c}{2b_m} A'_5 \right] \right\}$ $v'_H = \frac{a}{b_m} \left\{ 2 \frac{r}{b_m} \left[\left(\frac{r}{b_m} - M'_H \right) A'_1 \right] + \frac{a}{2b_m} \left[- (M'_H + \frac{c}{2b_m}) A'_2 + \frac{c}{2b_m} A'_6 \right] \right\}$ <p>Coeficientes A'_1, A'_2, \dots na figura B.7</p> $V_t = 2ba^2 \left[2 \left(1 + \frac{c}{a} \right) \left(2 + \frac{c}{a} \right) - \pi \right]$ $V_o \cong 2bfa \left[2 \left(\frac{d}{a} - 1 \right) + \left(\frac{f}{a} + 2 \frac{c}{a} \right) \right]$
	$L_1 = d + c/2$ $L_2 = (f + c) / 2$ $b_m = L_1$ $M_x = - \frac{W}{2} b_m M'_x$ $M'_x = M'_H - \frac{x}{b_m}$ $M_y = - \frac{Wb_m}{2} M'_H$

Fig. B.6 - Propriedades geométricas e valores relativos de elementos elásticos tipo anel.

A N E X O C

RESULTADOS DA ANÁLISE DE PROJETOS OBTIDOS COM O PROGRAMA IMPLEMENTADO

Neste anexo, apresentam-se os resultados da análise de projetos obtidos com o programa PEETE, para as 49 combinações de formas de elementos elásticos de transdutores de força uniaxial e princípios de conversão de deformação em sinal elétrico.

Os resultados estão classificados nas 7 tabelas que seguem, onde os princípios de conversão usados denotam-se por

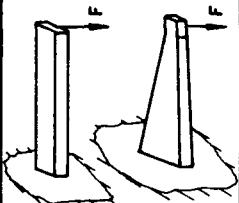
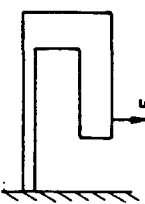
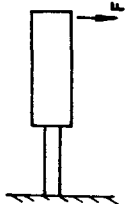
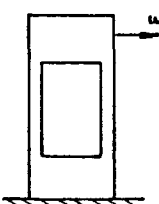
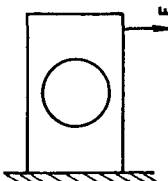
E : extensométrico;

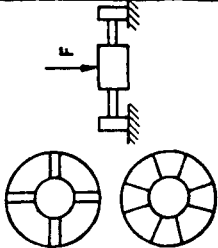
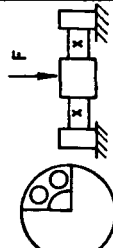
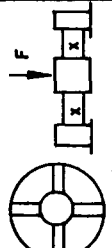
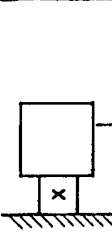
I : indutivo.

As tabelas estão organizadas em função das formas básicas e das suas variações de elementos elásticos viga, placa circular, anel e coluna.

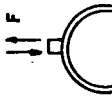
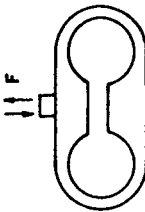
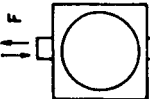
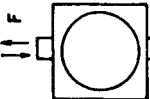
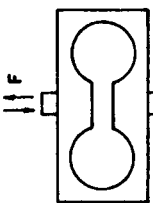
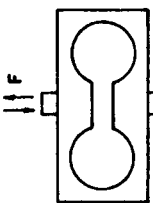
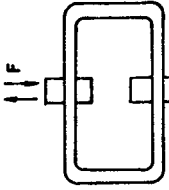
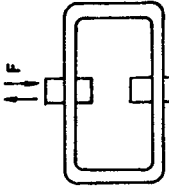
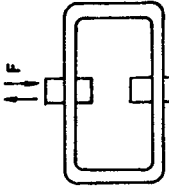
ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V. F. f. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (% VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NAO LIN. MECÂN. (% VF)	NAO LIN. ELÉTRIC. (% VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C. CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (mm ³)	TAMANHO (DIAM. x ALT.) (mm x mm)
VIGAS (FLEXÃO)	E	0.01 ...	0.30 ...	0.100 ...	0.000 ...	0.000 ...	0.003 ...	270 ...	0.024 ...	7 ...	0.0004 ...	12 ...	15 x 0.5 ...
		2000000	0.01	3.000	0.086	0.004	0.393	22	105	12	2.8	4 x 10 ⁶	200 x 70
	I	0.0005 ...	0.90 ...	0.150 ...	0.000 ...	0.2 ...	0.001 ...	405 ...	0.015 ...	6 ...	0.0003 ...	60 ...	50 x 0.25 ...
VIGAS (CISALHAMENTO)		2000000	0.003	52.0	0.150	(1)	0.467	15	8.94	14	0.2	1 x 10 ⁶	200 x 45
	E	100 ...	0.15 ...	0.200 ...	0.000 ...	0.000 ...	0.001 ...	497 ...	1.8 ...	8 ...	0.05 ...	840 ...	25 x 4 ...
		2000000	0.01	3.000	0.006		0.300	21	121	12	3.1	6 x 10 ⁶	300 x 40
ANÉIS													
	E	0.1 ...	0.30 ...	0.100 ...	0.01 ...	0.000 ...	0.003 ...	294 ...	0.68 ...	7 ...	0.01 ...	400 ...	10 x 10 ...
		1000000	0.01	3.000	0.30	0.35	0.530	22	19.8	12	0.5	0.86 x 10 ⁸	150 x 100
PLACAS	I	0.01 ...	0.70 ...	0.200 ...	0.001 ...	0.2 ...	0.002 ...	225 ...	0.03 ...	6 ...	0.0005 ...	15 x 10 ³ ...	44 x 44 ...
		1000000	0.002	80.0	0.95	(1)	0.760	18	8.1	15	0.2	2.1 x 10 ⁶	200 x 200
	E	1 ...	0.30 ...	0.100 ...	0.097 ...	0.000 ...	0.008 ...	195 ...	2.28 ...	7 ...	0.05 ...	61 ...	18 x 0.25 ...
COLUNAS		2000000	0.01	3.000	0.000	0.084	0.273	30	46.9	12	1.2	1.4 x 10 ⁶	150 x 60
	I	0.01 ...	0.27 ...	0.50 ...	0.088 ...	0.2 ...	0.005 ...	160 ...	0.084 ...	8 ...	0.001 ...	1744 ...	100 x 0.25 ...
		2000000	0.002	60.0	0.000	(1)	0.545	21	14.9	14	0.4	3.2 x 10 ⁶	220 x 70
	E	50 ...	0.30 ...	0.100 ...	0.004 ...	0.010 ...	0.001 ...	583 ...	7.08 ...	7 ...	0.2 ...	134 ...	5.4 x 5 ...
		10000000	0.01	2.500	0.075	0.215	0.300	29	28.2	12	5.6	6.8 x 10 ⁶	209 x 200
	I	100 ...	0.53 ...	0.255 ...	0.005 ...	0.2 ...	0.002 ...	320 ...	7.08 ...	7 ...	0.2 ...	1200 ...	7.6 x 25 ...
		10000000	0.002	50.0	0.118	(1)	0.472	23	56.3	14	1.1	5.3 x 10 ⁶	184 x 200

(1) : É A DO PRÓPRIO CONVERSOR INDUTIVO

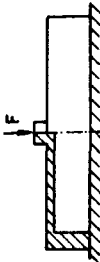
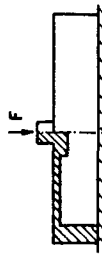
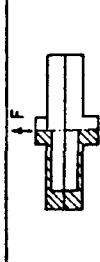
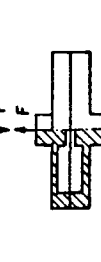
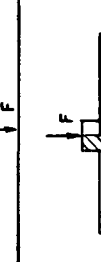
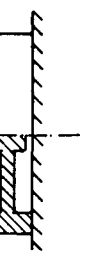
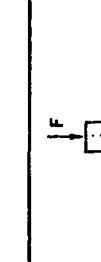

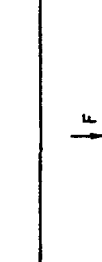
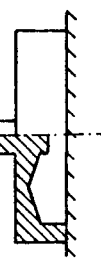
ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V. F. f. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (% VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NÃO LIN. MECÂN. (% VF)	NÃO LIN. ELÉTRIC. (% VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C. CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (mm ³)	TAMANHO (DIAM. x ALT.) (mm x mm)
	E	0.01 ... 1000	0.30 ... 0.01	0.100 ... 3.075	-0.001 ... -0.010	0.000	0.140 ... 0.391	42 ... 25	0.18 ... 5.66	7 ... 12	0.003 ... 0.1	100 ... 3700	30 x 0.24 ... 30 x 1.05
	I	0.0005 ... 1000	0.60 ... 0.004	0.500 ... 30.0	-0.000 ... -0.003	0.2 (1)	0.005 ... 0.283	155 ... 30	0.21 ... 3.36	8 ... 13	0.003 ... 0.1	60 ... 3000	30 x 0.25 ... 40 x 7.6
	E	0.01 ... 1000	0.30 ... 0.01	0.100 ... 3.075	-0.001 ... -0.064	0.000	0.055 ... 0.393	22 ... 42	0.024 ... 2.40	8 ... 13	0.0004 ... 0.06	12 ... 1800	15 x 0.10 ... 30 x 0.4
	I	0.0005 ... 1000	0.60 ... 0.003	0.500 ... 40.0	-0.00 ... -0.003	0.2 (1)	0.005 ... 0.377	72 ... 15	0.013 ... 0.94	8 ... 14	0.0003 ... 0.03	120 ... 2700	50 x 0.25 ... 50 x 5.5
	E	0.1 ... 1000	0.30 ... 0.01	0.100 ... 3.075	-0.000 ... -0.002	0.000	0.084 ... 0.390	54 ... 25	0.13 ... 1.23	8 ... 13	0.002 ... 0.03	300 ... 5500	60 x 0.64 ... 52 x 8.8
	I	0.0005 ... 1000	0.60 ... 0.003	0.500 ... 50.00	-0.000 ... -0.011	0.2 (1)	0.005 ... 0.472	115 ... 23	0.08 ... 1.52	8 ... 14	0.001 ... 0.03	80 ... 1600	35 x 0.27 ... 35 x 5.6
	E	0.1 ... 10000	0.30 ... 0.01	0.500 ... 3.075	-0.064 ... -0.000	0.000	0.393 ... 0.045	120 ... 27	0.26 ... 6.35	8 ... 13	0.004 ... 0.2	1100 ... 38000	15 x 15.6 ... 40 x 60
	I	0.01 ... 10000	0.34 ... 0.003	0.400 ... 50.0	-0.000 ... -0.015	0.2 (1)	0.004 ... 0.472	115 ... 23	0.21 ... 2.70	7 ... 14	0.004 ... 0.08	2200 ... 15000	20 x 20.6 ... 30 x 40
	E	1 ... 100000	0.30 ... 0.01	0.100 ... 3.075	-0.000 ... -0.000	0.000	0.003 ... 0.099	267 ... 50	0.70 ... 7.00	7 ... 12	0.01 ... 0.2	4500 ... 220000	20 x 20.4 ... 60 x 90
	I	0.5 ... 100000	0.20 ... 0.003	0.800 ... 52.0	-0.000 ... -0.006	0.2 (1)	0.009 ... 0.487	180 ... 23	0.79 ... 2.70	8 ... 14	0.01 ... 0.08	1500 ... 80000	15 x 15.2 ... 50 x 64

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V. F. f. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (% VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NÃO LIN. MECÂN. (% VF)	NÃO LIN. ELÉTRIC. (% VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C. CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (mm ³)	TAMANHO (DIAM. x ALT.) (mm x mm)
	E	10 ... 2000 000	0.06 ... 0.01	0.500 ... 3.000	-0.086 ... -0.000	-0.004 ... -0.000	0.017 ... 0.053	119 ... 60	6.25 ... 43.3	10 ... 12	0.1 ... 1.2	430 ... 4 x 10 ⁶	25 x 0.87 ... 200 x 70
		0.01 ... 2000000	0.90 ... 0.005	0.150 ... 27.0	-0.002 ... -0.115	0.2 ... (1)	0.001 ... 0.256	405 ... 30	1.5 ... 4.37	6 ... 13	0.01 ... 0.1	83 ... 1 x 10 ⁶	25 x 0.17 ... 200 x 45
		10 ... 2000000	0.10 ... 0.01	0.300 ... 3.000	-0.034 ... -0.000	-0.004 ... -0.000	0.004 ... 0.024	253 ... 83	9.50 ... 105	9 ... 12	0.2 ... 2.8	590 ... 1 x 10 ⁶	28 x 0.93 ... 250 x 30
		0.01 ... 2000000	0.90 ... 0.004	0.150 ... 30.0	-0.000 ... -0.146	0.2 ... (1)	0.001 ... 0.283	405 ... 30	1.59 ... 8.94	6 ... 13	0.02 ... 0.2	100 ... 0.9 x 10 ⁶	24.4 x 0.22 ... 200 x 15
 DEF. CISCALHANTE	E	100 ... 2000000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.000	0.000 ... 0.000	0.001 ... 0.012	497 ... 130	8.08 ... 121	9 ... 12	0.2 ... 3.1	2060 ... 6 x 10 ⁶	2.6 x 4.0 ... 300 x 40
		100 ... 2000 000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.003	0.000 ... 0.000	0.005 ... 0.084	216 ... 54	6.95 ... 77	9 ... 12	0.2 ... 1.9	1960 ... 4.2 x 10 ⁶	25 x 4 ... 200 x 70
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150
 DEF. CISCALHANTE	E	100 ... 2000000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.000	0.000 ... 0.000	0.001 ... 0.012	497 ... 130	8.08 ... 121	9 ... 12	0.2 ... 3.1	2060 ... 6 x 10 ⁶	2.6 x 4.0 ... 300 x 40
		100 ... 2000 000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.003	0.000 ... 0.000	0.005 ... 0.084	216 ... 54	6.95 ... 77	9 ... 12	0.2 ... 1.9	1960 ... 4.2 x 10 ⁶	25 x 4 ... 200 x 70
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150
 DEF. CISCALHANTE	E	100 ... 2000000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.000	0.000 ... 0.000	0.001 ... 0.012	497 ... 130	8.08 ... 121	9 ... 12	0.2 ... 3.1	2060 ... 6 x 10 ⁶	2.6 x 4.0 ... 300 x 40
		100 ... 2000 000	0.09 ... 0.01	0.350 ... 3.000	-0.000 ... -0.003	0.000 ... 0.000	0.005 ... 0.084	216 ... 54	6.95 ... 77	9 ... 12	0.2 ... 1.9	1960 ... 4.2 x 10 ⁶	25 x 4 ... 200 x 70
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150
		100 ... 2000000	0.15 ... 0.01	0.200 ... 3.000	-0.000 ... -0.006	0.000 ... 0.000	0.075 ... 0.300	57 ... 21	1.80 ... 11.4	8 ... 12	0.05 ... 0.3	840 ... 0.08 x 10 ⁶	30 x 7 ... 200 x 150

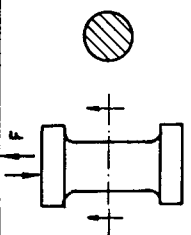
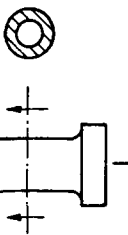
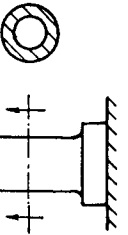
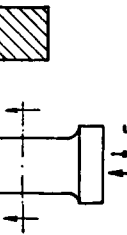
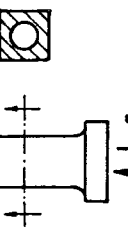
(1) É A DO PRÓPRIO CONVERSOR INDUTIVO

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V.F.F. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (% VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NÃO LIN. MECÂN. (% VF)	NÃO LIN. ELÉTRIC. (% VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C. CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (mm ³)	TAMANHO (DIAM. x ALT.) (mm x mm)
	E	1.0 ...	0.30 ...	0.100 ...	-0.03 ...	-0.002 ...	0.003 ...	294 ...	1.40 ...	7 ...	0.04 ...	500 ...	11 x 11 ...
	I	100000 ...	0.01 ...	2.700 ...	-0.50 ...	-0.15 ...	0.530 ...	22 ...	11.6 ...	12 ...	0.2 ...	0.80 x 10 ⁶ ...	144 x 144 ...
	E	1.0 ...	0.30 ...	0.100 ...	-0.02 ...	-0.001 ...	0.007 ...	167 ...	1.84 ...	7 ...	0.04 ...	2240 ...	26 x 11 ...
	I	100000 ...	0.01 ...	2.700 ...	-0.30 ...	-0.16 ...	0.180 ...	37 ...	4.90 ...	12 ...	0.1 ...	0.86 x 10 ⁶ ...	150 x 100 ...
	E	0.01 ...	0.70 ...	0.200 ...	-0.001 ...	0.2 ...	0.002 ...	138 ...	0.22 ...	6 ...	0.003 ...	4.6 x 10 ⁴ ...	96 x 44 ...
	I	500000 ...	0.002 ...	80.000 ...	-0.74 ...	(1) ...	0.76 ...	18 ...	1.67 ...	15 ...	0.05 ...	1.30 x 10 ⁶ ...	164 x 100 ...
	E	1.0 ...	0.30 ...	0.200 ...	-0.09 ...	-0.008 ...	0.006 ...	200 ...	5.10 ...	8 ...	0.1 ...	400 ...	10 x 10 ...
	I	100000 ...	0.01 ...	2.700 ...	-0.40 ...	-0.35 ...	0.070 ...	59 ...	19.8 ...	12 ...	0.5 ...	0.30 x 10 ⁶ ...	90 x 90 ...
	E	0.1 ...	0.30 ...	0.500 ...	-0.01 ...	0.2 ...	0.005 ...	180 ...	0.30 ...	8 ...	0.005 ...	3.3 x 10 ⁴ ...	43 x 43 ...
	I	1000000 ...	0.004 ...	35.000 ...	-0.80 ...	(1) ...	0.330 ...	27 ...	8.10 ...	14 ...	0.2 ...	0.70 x 10 ⁶ ...	120 x 120 ...
	E	0.1 ...	0.30 ...	0.100 ...	-0.01 ...	-0.000 ...	0.004 ...	230 ...	0.68 ...	7 ...	0.01 ...	2420 ...	32 x 10 ...
	I	100000 ...	0.01 ...	3.000 ...	-0.25 ...	-0.25 ...	0.17 ...	38 ...	3.67 ...	12 ...	0.1 ...	0.80 x 10 ⁶ ...	156 x 80 ...
	E	0.01 ...	0.30 ...	0.500 ...	-0.004 ...	0.2 ...	0.005 ...	130 ...	0.03 ...	8 ...	0.0005 ...	1.0 x 10 ⁵ ...	106 x 42 ...
	I	100000 ...	0.002 ...	80.000 ...	-0.30 ...	(1) ...	0.760 ...	18 ...	0.80 ...	15 ...	0.03 ...	1.3 x 10 ⁶ ...	180 x 80 ...
	E	1.0 ...	0.30 ...	0.100 ...	-0.01 ...	0.000 ...	0.006 ...	170 ...	1.30 ...	7 ...	0.04 ...	560 ...	16 x 6 ...
	I	100000 ...	0.01 ...	2.800 ...	-0.50 ...	0.000 ...	0.510 ...	22 ...	6.80 ...	12 ...	0.2 ...	0.80 x 10 ⁶ ...	160 x 90 ...
	E	0.01 ...	0.50 ...	0.250 ...	-0.001 ...	0.2 ...	0.002 ...	225 ...	0.31 ...	7 ...	0.005 ...	2.1 x 10 ⁴ ...	53 x 26 ...
	I	100000 ...	0.002 ...	80.000 ...	-0.40 ...	(1) ...	0.760 ...	18 ...	2.12 ...	15 ...	0.07 ...	0.50 x 10 ⁶ ...	160 x 90 ...

(1): É A DO PRÓPRIO CONVERSOR INDUTIVO

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V. F. f. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (%VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NÃO LIN. MECAN. (%VF)	NÃO LIN. ELÉTRIC. (%VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C. CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (mm ³)	TAMANHO (DIAM. x ALT.) (mm x mm)
	E	1	0.20	0.150	-0.097	-0.004	0.011	152	5.60	8	0.1	64	18 x 0.25
		... 2000000	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	I	0.01	0.27	0.500	-0.078	0.2	0.005	135	0.17	8	0.003	1790	100 x 0.23
		... 2000000	...	...	...	(1)	0.272	30	14.9	13	0.4	15 x 10 ⁵	220 x 30
	E	1	0.20	0.150	-0.026	-0.005	0.022	107	2.80	8	0.05	120	18 x 0.50
		... 2000000	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	I	0.01	0.27	0.500	-0.076	0.2	0.005	98	0.11	8	0.002	4500	100 x 0.60
		... 2000000	...	...	...	(1)	0.545	21	8.09	14	0.2	3.2 x 10 ⁶	220 x 70
	E	1	0.31	0.100	-0.081	0.000	0.008	195	4.94	7	0.08	84	20 x 0.27
		... 2000000	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	I	0.01	0.27	0.500	-0.078	0.2	0.005	135	0.17	8	0.003	1790	100 x 0.23
		... 2000000	...	...	...	(1)	0.272	30	14.9	13	0.4	15 x 10 ⁵	220 x 30
	E	10	0.10	0.300	-0.091	-0.004	0.019	94	2.29	9	0.05	400	30 x 0.60
		... 2000000	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	I	0.01	0.27	0.500	-0.080	0.2	0.005	130	0.084	8	0.001	7100	140 x 0.50
		... 500000	...	...	...	(1)	0.377	30	3.94	14	0.1	3.7 x 10 ⁵	140 x 24
	E	1	0.30	0.100	-0.076	-0.007	0.012	142	5.60	7	0.1	61	18 x 0.24
		... 2000000	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	I	0.01	0.27	0.500	-0.088	0.2	0.005	160	0.17	8	0.003	1744	100 x 0.22
		... 2000000	...	...	...	(1)	0.352	27	6.00	14	1.7	19 x 10 ⁵	220 x 36

(1): É A DO PRÓPRIO CONVERSOR INDUTIVO

ELEMENTO ELÁSTICO	PRINCÍPIO	V.F.f. MEDIÇÃO (N)	RESOL. (% VF)	SINAL SAÍDA (mV/V)	NÃO LIN. MECÂN. (% VF)	NÃO LIN. ELÉTRIC. (% VF)	DESLOC. PARA VF (mm)	FREQ. NAT. PARA VF (Hz)	FREQ. NAT. LIVRE (kHz)	QUANT. INFORM. (bit)	C.CANAL MAX. (Mbit/s)	VOLUME (m m ³)	TAMANHO (DIAM.XALT) (mm x mm)
	E	1000 ...	0.041 ...	0.750 ...	-0.027 ...	-0.075 ...	0.005 ...	213 ...	141 ...	10 ...	3.2 ...	250 ...	5.6 x 10 ...
	I	100000000	0.015	2.000	-0.075	-0.215	0.225	33	9.44	12	0.2	4.8 x 10 ⁶	203 x 150
	E	1000 ...	0.27 ...	0.500 ...	-0.009 ...	0.2	0.005 ...	230 ...	56.3 ...	8 ...	1.0 ...	1813 ...	9.6 x 25 ...
	I	100000000	0.004	30.0	-0.094	(1)	0.283	30	9.44	13	0.3	3.8 x 10 ⁶	180 x 150
	E	100 ...	0.041 ...	0.750 ...	-0.027 ...	-0.075 ...	0.005 ...	213 ...	141 ...	10 ...	3.2 ...	220 ...	5.3 x 10 ...
	I	100000000	0.015	2.000	-0.075	-0.215	0.225	33	9.44	12	0.2	5.5 x 10 ⁶	216 x 15
	E	100 ...	0.27 ...	0.500 ...	-0.009 ...	0.2	0.005 ...	230 ...	56.3 ...	8 ...	1.0 ...	1140 ...	7.6 x 25 ...
	I	100000000	0.004	30.0	-0.101	(1)	0.283	30	9.44	13	0.3	4.42 x 10 ⁶	194 x 150
	E	50 ...	0.24 ...	0.130 ...	0.005 ...	0.013 ...	-0.001 ...	513 ...	141 ...	8 ...	3.2 ...	270 ...	5.9 x 10 ...
	I	100000000	0.015	2.000	0.075	0.215	-0.225	33	9.44	12	0.2	5.5 x 10 ⁶	216 x 150
	E	100 ...	0.53 ...	0.255 ...	0.005 ...	0.2	-0.002 ...	320 ...	56.3 ...	7 ...	1.0 ...	1320 ...	8.2 x 25 ...
	I	100000000	0.004	30.0	0.118	(1)	-0.283	30	9.44	13	0.3	5.02 x 10 ⁶	206 x 150
	E	1000 ...	0.041 ...	0.750 ...	-0.027 ...	-0.075 ...	0.008 ...	174 ...	93.9 ...	10 ...	2.1 ...	490 ...	6.4 x 15 ...
	I	100000000	0.015	2.000	-0.075	-0.215	0.300	29	7.08	12	0.2	6.44 x 10 ⁶	203 x 200
	E	1000 ...	0.134 ...	1.000 ...	-0.019 ...	0.2	0.009 ...	162 ...	56.3 ...	9 ...	1.1 ...	1200 ...	7.8 x 25 ...
	I	100000000	0.003	50.0	-0.118	(1)	0.472	23	7.08	14	0.2	4.10 x 10 ⁶	162 x 200
	E	1000 ...	0.059 ...	0.520 ...	-0.019 ...	-0.052 ...	0.008 ...	181 ...	70.4 ...	10 ...	1.5 ...	970 ...	7.8 x 20 ...
	I	100000000	0.015	2.000	-0.075	-0.215	0.300	29	7.08	12	0.2	6.84 x 10 ⁶	209 x 200
	E	1000 ...	0.051 ...	2.700 ...	-0.042 ...	0.2	0.025 ...	100 ...	47.0 ...	10 ...	1.0 ...	1450 ...	7.8 x 30 ...
	I	100000000	0.002	45.0	-0.106	(1)	0.425	24	7.08	14	0.2	5.33 x 10 ⁶	184 x 200

(1): É A DO PRÓPRIO CONVERSOR INDUTIVO

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABDULLAH, F. & ERDEM, U. Mathematical modelling and design of a shear force load cell transducer. VDI-Berichte, Nr. 312, 149-155, 1978.
- [2] ABDULLAH, F. & FINKELSTEIN, L. A Review of Mathematical Modelling of Instrument Transducers. IMEKO 9th World Congress, May, 1982, Berlin (West), Preprint V. V/III, 276-286.
- [3] ABDULLAH, F. FINKELSTEIN, L. & RAHMAN, M.M. The Application of Mathematical Models in the Evaluation and Design of Electromechanical Instrument Transducers. Journal of Applied Science and Engineering A, V. 2, 3-26, 1977.
- [4] ABDULLAH, F. & RAHMAN, M.M. Computer Aided design of Elastic Elements in Instrumentation. IMEKO 11th World Congress, Houston, Texas, USA, 143-158, Oct. 1988.
- [5] AKTAN, A.E. & BERTERO, V.V. Measuring Internal Forces of Redundant Structures. Experimental Mechanics, 367-375, Dec. 1985.
- [6] ALLOCA, J.A. & ALLEN, I.S. Transducers : theory and application. Reston Publishing Company, Inc., 1984.
- [7] ANDERSON, P.G. Techniques for the Design of Integral - component Load Sensors. Experimental mechanics, 282-288, July, 1975.
- [8] ANDERSSON, V. Projeto de um Transdutor de Força tipo Coluna Tubular a Base de Extensômetros Elétricos Resistivos (trabalho interno, não publicado). DMC-FURG, Rio Grande, RS, 1981.
- [9] ANDERSSON, V. CAE II - Análise Estrutural. Notas do trabalho

apresentado em seminário no curso de pós-graduação *Tópicos Especiais em Projeto:CAD*, UFSC, Florianópolis, agosto, 1986.

- [10] ANDERSSON, V. Modelo Matemático de Elementos Elásticos Tipo Copo para Transdutores de Força. Anais do X COBEM, V. II, 443-446, Rio de Janeiro, Dez., 1989.
- [11] ANDERSSON, V., ASSUITI, C.H., FERREIRA, A.L. Pesquisa das Características de Transdutores de Força Comerciais. Tarefa LABMETRO No. 558, CT/UFSC, julho, 1987.
- [12] ANDERSSON, V. & LÜCKE, H.A.H. CAD in Transducers Design. IMEKO 11th World Congress, V. Applications, 601-608, Houston, Texas, USA, oct. 1988.
- [13] ANDERSSON, V. e LÜCKE, H.A.H. Critérios Adequados para Projetar Elementos Elásticos de Transdutores Elétricos em Microcomputadores. Anais do X COBEM, Rio de Janeiro, V. II, 197-200, dez., 1989.
- [14] ANSYS-PC/LINEAR. User's Manual, Swanson Analysis, Inc., Johnson Road, P.O. Box 65, Houston, PA 15342-0065, USA.
- [15] ASIMOV, M. Introdução ao Projeto de Engenharia. Editora Mestre Jou, São Paulo, 1968.
- [16] ASPECTOS Práticos dos Medidores de Pressão. Revista C & I, 18-25, Fev. 1982.
- [17] ASSUITI, C.H. e ANDERSSON, V. Estudo da Posição de Máxima Tensão e Deslocamento Máximo do Sensor Elástico de Transdutor de Força do Tipo Viga Dupla com furo Circular. Tarefa LABMETRO, UFSC, Florianópolis, SC, abril, 1988.
- [18] BACK, N. Metodologia de Projeto de produtos Industriais. Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1983.
- [19] BAHRA, C.S. & EVANS, J.W. Strain Gauge Loadcell design and Use. Proceedings of Transducers Conference, Tempcon, London,

1-22, June, 1983.

- [20] BARBATO, G. et alli. Load-Cell-design Developments by Numerical and Experimental Methods. Experimental Mechanics, 341-348, Sept. 1981.
- [21] BARBATO, G. et alli. Methods for the design of Flattened - ring Dynamometers. IMEKO 11th World Congress, Houston, Texas, USA, 663-669, Oct. 1988.
- [22] BELYAEV, N.M. Strenght of Materials. Mir, Moscow, 1979.
- [23] BENAYOUNE, M. & PREECE, P.E. Methodology for the design of databases for engineering applications : Computer-aided design, V.18, Nr.5, 257-262, jun. 1986.
- [24] BENTLEY, J.P. Principles of Measurement Systems. Longman Group Limited, London, 1983.
- [25] BERALDO, A.T.M. & CUNHA , G.C. Sistemas CAD: Evolução e Tendências. Informática & Administração, 8-11, agosto, 1985.
- [26] BOEHS, L. & BORGES, R. Banco de Dados de Usinagem : Implantação e Utilização em Microcomputador. Anais do X COBEM, V.II, 639-642, Dez., 1989.
- [27] BOSMAN, D. Instrument Science : Systematic design of instrumentation systems. J. Phys. E.: Sci. Instrum. ,V. 11, 97-105, 1978.
- [28] BRAY, A. The Design of Proving Rings with Strain Gauges. Materialprüf, V. 12, Nr. 6, 200-205, Juni, 1970.
- [29] BRAY, A. The Role of Stress Analysis in the Desing of Force - Standard Transducers. Experimental Mechanics, 1-20, Jan. 1981.
- [30] BREBBIA, C.A., TELLES, J.C.F., WROBEL, L.C. Boundary Element Techniques : Theory and Applications in Engineering. Springer - Verlag, 1984.

- [31] CHASEN, S.H. Historical Highlights of Interactive Computer Graphics. Mechanical Engineering, 32-41, Nov. 1981.
- [32] CLARK, C. A differential pressure transducer for the measurement of high-frequency fluctuations in liquids. J. Phys. E.: Sci. Instrum., V. 18, 297-302, 1985.
- [33] DALLY, J.W., RILEY, W.F. & McCONNELL, K.G. Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [34] DEN HARTOG, J.P. Advanced Strength of Materials. McGraw - Hill, 1952.
- [35] DOEBELIN, E.O. Measurement Systems: Application and Design. McGraw Hill Inc., 1983.
- [36] DOLOVICH, A.T. et alli An Approximate Solution of the Axisymmetric von Karman Equations for a Point-Loaded Circular Plate. J. of Applied Mechanics, V. 55, 241-243, March, 1988.
- [37] DORSEY, J. Homegrow Strain - gage Transducers. Experimental Mechanics, 255-260, July, 1977.
- [38] DORSEY, J. Very High Resistance Bonded Foil Strain Gages. IMEKO 9th World Congress, May, 1982. Berlin (West), Preprint Vol. V/III, 343-349.
- [39] DUBOIS, M. Six-Component Strain-gage Balances for Large Wind Tunnels. Experimental Mechanics, 401-407, Nov. 1981.
- [40] ERDEM, U. Instrument Science and technology : Force and weight measurement. J. Phys. E.: SCI. Instrum., V. 15, 857-872, 1982.
- [41] FERREIRA, A.L. & ANDERSSON, V. Pesquisa das Características de Transdutores de Pressão Comerciais, LABMETRO - CT/UFSC, Nov., 1988.
- [42] FINKELSTEIN, L. Instrument Science : Introductory article.

- J. Phys. E.: Sci. Instrum., V. 10, 566-572, 1977.
- [43] FINKELSTEIN, L. Design-oriented teaching of measurement and instrumentation. Measurement, V. 4, Nr. 3, 89-92, July/Sept. 1986.
- [44] FINKELSTEIN, L. & FINKELSTEIN, A.C.W. Review of design methodology. IEE Proceedings, V. 130, Pt. A, Nr. 4, 213-222, 1983.
- [45] FINKELSTEIN, L. & WATTS, R.D. Mathematical models of instruments - fundamental principles. J. Phys. E.: Sci Instrum., V. 11, 841-855, 1978.
- [46] FITZGERALD, J.E. & HUFFERD, W.L. Interaction of a Diafrgm pressure Gage with a Viscoelastic Halfspace. Experimental Mechanics, 257-265, july, 1970.
- [47] FLÜGGE, W. Handbook of Engineering Mechanics, McGraw-Hill, 1962.
- [48] GRUPO PET (Programa Especial de Treinamento). Pesquisa de Características de Transdutores Comerciais de Torque, Deformação e Aceleração. CERTI/LABMETRO, UFSC, Florianópolis, out., 1988.
- [49] GURVICH, E.T. & PERELMAN, E.I. Computing Bars with Elastic Joints for Weighing and Dynamometer Devices. Measurement Techniques, Plenum Publishing Corporation, 1130-1132, 1974.
- [50] HELLWIG, R. Präzisions-Kraftaufnehmer für internationale Vergleichsmessungen an Kraftnormalmeßeinrichtungen. Messtechnische Briefe, 22, Heft 2, 47-52, 1986.
- [51] HOFFMANN, K. Zur Herstellung Moderner Folien - Dehnungsmeßstreifen und den dabei gegebenen korrekturmöglichkeiten für Kriechen und Querempfindlichkeit. Messtechnische Briefe 22, Heft 2,

41-46, 1986.

- [52] HOFMANN, D. Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung. Vieweg, 1983.
- [53] IGLESIAS, G.E. & IGLESIAS, E.A. Linearization of Transducer Signals Using an Analog-to-Digital Converter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, V. 37, Nr. 1, 53-57, March, 1988.
- [54] INGLIS, S. et alii. A Comparison of modes for using CAD. Computer-aided design, V. 17, Nr. 5, 230-234, June, 1985.
- [55] INTERNATIONAL vocabulary of basic and general terms in Metrology. Publicação das entidades BIPM, IEC, ISO, OIML, 1984.
- [56] JADRNICEK, R. Computer - aided Design: Significant CAD power is coming for desktop microcomputers. Byte Publications Inc., Jan. 1984.
- [57] JOHNSON, R.C. Optimum Design of Mechanical Elements. John Wiley & Sons, Inc., 1961.
- [58] KEIL, S. & HOFFMANN, K. Verstimmung der Wheatstoneschen Brückenschaltung beim Messen mit Dehnungsmeßstreifen. VDI-Z V. 115, Nr. 11, 904-911, 1973.
- [59] KEIL, S. & JASCHINSKI, A. Dehnungsmeßstreifen in Meßwertaufnehmern. Messen + prüfen/automatik, 655-661, Okt. 1978.
- [60] KRAFTAUFNEHMER mit DMS-Meßsystem. HBM Bedienungsanleitung, 200.00 - 07-20.
- [61] KREUZER, M. Linearitäts-und Empfindlichkeitsfehler beim Messen mit Einzeldehnungsmeßstreifen bei spannungsgespeisten und Stromgespeisten Schaltungen. Messtechnische Briefe, V. 10, Heft 2, 37-42, 1983.

- [62] LIBERTINY, G.Z. The Design of Multiaxial Force/Moment Transducers with Particular Emphasis on the Problem of Cross-talk. *Experimental Mechanics*, 403-408, Oct. 1975.
- [63] MACCARTHY, B. L. et alii. A constrained optimization technique to improve the performance of strain gauge Transducers. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, V. 200, Nr. C2, 135-141, 1986.
- [64] MADDOCKS, D.V. A transducer to measure the radial effective soil stress and the pore water pressure acting on the surface of a driven, steel pile. *CUED/D-SOILS/TR131*, Jan. 1983.
- [65] MAGALHES, L. P. Computação Gráfica. Editora da UNICAMP/Editora Papirus, Campinas, 1986.
- [66] MANOUCHEHR, G. Large Deflection of Circular Plates with or without Hole at Center. *J. of Eng. Mech.*, ASCE, V. 114, Nr. 10, 1803-1809, Oct. 1988.
- [67] MCCONNELL, K. G. & HAN, S. Effect of mass on force - transducer sensitivity. *Experimental Techniques*, 19-22, July, 1986.
- [68] MINAEV, I.G. & MLYI, E.N. Calculation of the Parameters of Elastic strain-Gauge Systems for Measuring Pressure. *Measurement Techniques*, Plenum Publishing Corp., 724-727, 1981.
- [69] MODERN Strain Gage Transducers... Their Design and Construction. *Epsilonics*, parts I-IX, oct. 1981 - oct. 1984.
- [70] MOSKALIK, L.M. & RYADCHIKOV, V.E. Compensation of the Temperature Error in the Elastic Components of Measurement Transducers. *Measurement Techniques*, Plenum Publishing

Corp., 1057-1059, 1982.

- [71] MTS Extensometer and clip Gage Catalog. MTS Systems Corporation, Minneapolis, Minnesota 55424, USA.
- [72] NORTON, H.N. Sensor and Analyzer Handbook. Prentice Hall, Inc., 1982.
- [73] ORT, W.J. Sensors Using Strain Gages. IMEKO 9th World Congress, May, 1982. Berlin (West), Preprint Vol. V/III, 372-386.
- [74] PAETOW, J. Aufbau und Eigenschaften von Wägezellen mit Dehnungsmeßstreifen. HBM, Elektrisches Messen Mechanischer Größen, VD 75004.
- [75] PETERSON, R.E. Stress Concentration Factors. Wiley, 1973.
- [76] POKHVALINSKII, S.M. Temperature Errors of Membrane Pressure Converters. Measurement Techniques, Plenum Publishing Corp., 425-428, 1979.
- [77] ROARK, R.J. & YOUNG, W.C. Formulas for Stress and Strain. Int. Student Edition, Fifth edition, 1975.
- [78] ROHRBACH, C. Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1967.
- [79] ROHRBACH, C. & LEXOW, J. Miniature force Transducers with Strain Gauges. Measurement, V. 4, Nr. 3, 93-100, July/Sept. 1986.
- [80] SCHAEFFER, L. et alli. Projeto e Construção de uma Célula de Carga para Medição de Esforços de Laminação. Revista Brasileira de Tecnologia, V. 10, 3-13, 1979.
- [81] SHEVTSOV, YU. A. Strain-Gauge Dynamometer. Measurement Techniques, Plenum Publishing Corporation, 684-686, 1979.
- [82] SIDDALL, J.N. Optimal Engineering Design : Principles and Applications. Marcel Dekker, Inc., New York, 1982.

- [83] SIEBERS, G.R. An introduction to computer graphics. Computer-aided design, V. 18, Nr. 3, 161-179, Apr. 1986.
- [84] STEFANESCU, D.M. Study of S-shaped Flexible Elements of Force Transducers Instrumented with Strain Gages Using the Finite Element Method. IMEKO 11th World Congress, Houston, Texas, USA, 645-652, Oct. 1988.
- [85] SUNDIN, K.G. & JONSSON, M. A stiff and Compact Impact-Force Transducer Based on Strain Measurement. Experimental Mechanics, 48-53, Mar. 1985.
- [86] SYDENHAM, P.H. Instrument Science and Technology : Elastic design of fine mechanism in instruments. J. Phys. E.: Sci. Instrum., V. 17, 922-930, 1984.
- [87] SYDENHAM, P.H. Computer-aided engineering of measuring instrument systems. CAE Journal, V. 4, Nr. 3, 117-123, 1987.
- [88] TIMOSHENKO, S. & WOINOWSKY-KRIEGER, S. Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill, Inc., 1959.
- [89] TN-504, Temperature - Induced Apparent Strain and Gage Factor Variation in Strain Gages. Measurements Group, Inc., 1983.
- [90] TOKAR, N.G. Determining the Shape of Dynamometer Springs. Measurement Techniques, Plenum Publishing Corporation, 621-623, 1968.
- [91] TOZZI, C.L. PAC: Projeto Auxiliado por computador. Editora da UNICAMP/Editora Papirus, Campinas, 1986.
- [92] TRIETLEY, H.L. Transducers in Mechanical and Electronic Design. Marcel Dekker, Inc., New York, 1986.
- [93] VÁRIOS AUTORES. Transdutores y Medidores Electrónicos. Marcombo, S.A. (Boixareu Editores), Barcelona, 1983.
- [94] VÁRIOS AUTORES. Sistemas CAD/CAM/CAE: Diseño y Fabricacion

por Computador. Marcombo, S.A. (Boixareu Editores),
Barcelona, 1986.

- [95] VOCABULÁRIO de metrologia legal e vocabulário de termos fundamentais e gerais de metrologia. INMETRO, 1987.
- [96] WALTON, D. et alli Computer-aided fatigue analysis. Computer-aided design, V. 18, Nr. 5, 263-274, jun., 1986.
- [97] WOLF, H. & HEIL, D. Analoges elektrisches Messen von Kräften, Drücken, und Beschleunigungen. Und-oder-nor + steuerungstechnik, 9-11, 1978.
- [98] WOSCHNI, E.G. Instrument Science : Dynamics of measurement - relations to system and information theory. J. Phys. E : Sci. Instrument., V. 10, 1081-1092, 1977.
- [99] ZHANG, H. et alli Study on the Nonlinearity of the Super Precision Load Cell. IMEKO 11th World Congress, Houston, Texas, USA, V. Sensors, 637-644, Oct. 1988.

características da grandeza de medição e de construção mecânica							
princípio	No. de com- ponentes	UF-v. final da f. med. estat. adm.	acel. max [g]	acel. max dinam. adm. [g]	tamanho [mmXmmXmm]	massa [g]	amorteci- mento
piezo- elétrico	uniaxial	1...1000	---	6...4000	Ø 3.6x2.40	14...500	---
	triaxial	500...2000	---	---	26x26x170	85...41	---
piezorre- sistivo	uniaxial	1...150	30...150k	2...500k	3.5x3.5x4	0.5...55	---
	biaxial	5...5000	---	25...25k	...	2.5...6	---
colado	triaxial	5...20k	10k...40k	25...50k	25x25x21	2.5...35	0.01
	uniaxial	1...1000	---	3...3000	Ø 16x15.5	6.5...900	0.7
extens. colado	triaxial	2...1000	---	30...3000	Ø 64x65	45...160	0.7
	uniaxial	0.5...500	3...1000	---	Ø 16x17 56x27x64	0.5...500	0.6...0.8
indutivo	uniaxial	1...250	---	5...375	Ø 12.6x40 25x25x30	17...50	0.6
	uniaxial	1...100	---	3...300	62.5x54x36 73x56.5x45	180...330	---
balanco eletrost.	uniaxial	0.6...25	---	100	48x48x78.5	725	0.7...2
potencio- métrico	uniaxial	0.25...12	---	20...50	101x64x80	90...180	0.3...0.8
balanco de torque	triaxial	1...6	---	2000	---	500	0.6...0.8

características elétricas						
prin- cípio	alimentação [V]	signal de saída [mV]	signal de sai- da relativo [mV/V]	resist. isolamento [MΩ]	impedância de entrada [Ω]	impedância de saída [Ω]
piezo- elétrico	---	5000...10000	---	0.1...1E7	100	---
piezorr. colado	6...15 [10]	45...750 [200]	3...75 [22.5]	1...100	350...2500	345...2500
extensom- colado	1...3	1.25...3 [1.5]	0.5...1 [0.5]	> 500	120...300	120...300
extensom- de arame	5...10 [6]	3.125... 40 [20]	1.25...4 [3.5]	---	120...600	120...600
indutivo	2...10	100...400	9.55...80 [19]	---	41	1000
balanco eletrom.	15...28	1000...10000 [5000]	---	---	---	---
potencio- métrico	27	56.7...2241	2.1...83	---	1200...1500	---
balanco torque	15...32 [22]	1000...5000	8.4...500 [333]	---	---	---

Obs: entre [] estão valores usuais